

<https://vinaire.me/wp-content/uploads/2014/02/evolution-of-physics-einstein-1938.pdf>

EVOLUSI FISIKA

Albert Einstein & Leopold Infeld

Rangkuman oleh Angulimala

PENGANTAR

Sebelum mulai membaca buku ini, wajar bila Anda mengharapkan beberapa pertanyaan sederhana terjawab terlebih dahulu. Untuk apa sebenarnya buku ini ditulis? Siapa pembaca yang kami bayangkan ketika menyusunnya?

Pertanyaan-pertanyaan ini, meskipun tampak mudah, ternyata sulit dijawab secara jelas di awal. Ironisnya, jawaban semacam itu justru lebih mudah diberikan di akhir buku—tetapi tentu sudah terlambat. Karena itu kami memilih cara yang lebih sederhana: menjelaskan *apa yang tidak ingin kami lakukan* dalam buku ini.

Kami tidak menulis buku ajar fisika. Buku ini bukan kursus sistematis tentang fakta atau teori fisika. Yang ingin kami lakukan adalah melukiskan, dalam garis besar, bagaimana manusia berusaha menghubungkan dunia gagasan dengan dunia peristiwa nyata. Kami ingin menunjukkan kekuatan-kekuatan batin yang mendorong ilmu pengetahuan menciptakan konsep-konsep baru agar dapat memahami kenyataan.

Namun penyajian ini harus dibuat sederhana. Di tengah belantara fakta dan teori, kami harus memilih satu jalan utama—jalan yang menurut kami paling mewakili perkembangan fisika. Banyak topik yang terpaksa tidak dibahas, bukan karena tidak penting, tetapi karena tidak berada pada jalur penjelasan yang kami pilih. Jadi, jumlah halaman yang kami berikan pada sebuah persoalan bukan ukuran penting atau tidaknya topik tersebut.

Saat menulis buku ini, kami sering berdiskusi panjang mengenai seperti apa “pembaca ideal” kami. Kami membayangkan seseorang yang mungkin tidak memiliki bekal fisika maupun matematika, tetapi dikaruniai banyak keutamaan: ia tertarik pada gagasan fisik dan filosofis, dan memiliki kesabaran besar untuk mengikuti bagian-bagian yang mungkin terasa sulit atau kurang menarik. Ia memahami bahwa untuk mengerti satu halaman, ia harus membaca halaman sebelumnya dengan cermat. Ia tahu bahwa buku ilmiah—meski populer—tidak bisa dibaca seperti novel.

Buku ini hanyalah sebuah percakapan sederhana antara kami dan Anda. Anda mungkin akan merasa bosan atau justru tertarik, merasa datar atau bersemangat. Namun kami akan menganggap tujuan kami tercapai bila melalui halaman-halaman ini Anda memperoleh gambaran tentang perjuangan abadi akal manusia untuk memahami hukum-hukum yang mengatur alam fisik.

A.E.

L.I.

BAB I —

MUNCULNYA PANDANGAN MEKANISTIK

(The Rise of the Mechanical View)

KISAH MISTERI TERBESAR

Bayangkan ada sebuah novel detektif yang sempurna. Novel itu memberi semua petunjuk penting, dan membuat kita merangkai sendiri teori tentang apa yang sebenarnya terjadi. Bila kita mengikuti ceritanya dengan teliti, kita akan sampai pada solusi tepat pada saat sang penulis mengungkapkannya—tanpa rasa kecewa, tanpa kejutan yang tidak masuk akal. Semuanya terasa pas.

Nah, ilmuwan sering dibayangkan seperti pembaca novel semacam itu—hanya saja dalam kasus mereka, buku yang dibaca adalah alam semesta. Tetapi perbandingan ini tidak sepenuhnya tepat. Dalam novel misteri, pembaca tidak bisa mengubah ceritanya; sementara dalam ilmu pengetahuan,

ilmuwan harus menemukan sendiri makna dari “petunjuk-petunjuk” alam.

Yang lebih mengejutkan lagi: misteri besar ini belum selesai terpecahkan. Kita bahkan tidak tahu apakah ada “jawaban akhir”. Meski begitu, dari halaman-halaman yang telah berhasil “dibaca”, manusia telah mempelajari bahasa alam dan mengungkap banyak hal penting. Setiap kemajuan membawa rasa kagum dan kegembiraan, meskipun sering kali diperoleh melalui perjalanan yang panjang dan sulit.

Dan seperti layaknya cerita yang baik, semakin jauh kita membaca, semakin terlihat betapa indahnya susunan keseluruhan kisah ini—meskipun akhir cerita tampaknya justru semakin menjauh setiap kali kita mendekatinya.

Dalam banyak novel detektif, ada saat ketika sang penyelidik telah mengumpulkan cukup banyak fakta. Fakta-fakta itu tampaknya tidak berkaitan, aneh, bahkan saling bertentangan. Namun detektif tahu bahwa kini bukan waktunya mengumpulkan lebih banyak data—yang dibutuhkan adalah *berpikir*.

Ia menyalakan pipa atau memainkan biolanya, dan tiba-tiba... “Ah, tentu saja!” Ia bukan hanya menemukan penjelasan bagi petunjuk yang ada, tetapi juga dapat memperkirakan hal-hal yang belum ditemukan dan tahu persis di mana mencarinya.

Begitu pula bagi ilmuwan. Ia tidak bisa “membalik halaman terakhir” untuk langsung melihat jawaban. Ia *sendiri* adalah penyelidik dan pembaca sekaligus. Ia harus mengumpulkan fakta-fakta yang tercerai-berai, lalu berusaha menjadikannya satu kesatuan yang masuk akal.

Di sinilah petualangan pemikiran ilmiah dimulai.

PETUNJUK PERTAMA: MASALAH GERAK

Upaya manusia untuk membaca “buku besar” alam sebenarnya sudah dimulai sejak manusia pertama kali bertanya tentang dunia. Namun baru sekitar tiga ratus tahun yang lalu, pada masa Galileo dan Newton, manusia benar-benar mulai memahami bahasa yang digunakan alam untuk berbicara. Sejak saat itu, perjalanan ilmiah bergerak cepat, karena para peneliti telah menemukan metode—cara melihat, cara bertanya, dan cara menafsirkan petunjuk yang sebelumnya tersembunyi.

Salah satu persoalan paling tua dan rumit dalam sejarah pemikiran adalah pertanyaan tentang gerak. Gerak sebuah batu yang dilempar ke udara, gerak sebuah kapal di atas laut, gerak sebuah kereta yang didorong di jalan—semuanya

tampak sederhana, tetapi sebenarnya sangat rumit bila diamati dengan mata ilmu. Untuk memahaminya, manusia harus mulai dari bentuk gerak yang paling sederhana dan paling “murni,” sebelum melangkah ke bentuk gerak yang lebih kompleks.

Sekilas tampaknya gerak adalah sesuatu yang mudah dimengerti. Bila sebuah benda diam, kita tahu bahwa untuk membuatnya bergerak kita harus mengangkat, mendorong, atau menariknya. Pengalaman sehari-hari mengajarkan kita bahwa semakin besar dorongan yang kita berikan, semakin cepat benda itu bergerak. Kereta yang ditarik empat kuda tentu bergerak lebih cepat daripada kereta yang ditarik dua kuda. Dari pengalaman itu berkembang keyakinan bahwa kecepatan sebuah benda adalah akibat langsung dari gaya yang bekerja padanya.

Keyakinan sederhana ini bertahan sangat lama—bahkan berabad-abad—terutama karena wibawa besar Aristoteles, yang menuliskan bahwa sebuah benda bergerak hanya selama ada sesuatu yang mendorongnya. Bila dorongan berhenti, gerak pun berhenti. Pandangan ini tampak masuk akal bila dilihat dari pengalaman sehari-hari, dan karena itu diterima tanpa banyak dipertanyakan.

Namun Galileo menemukan bahwa intuisi manusia bukanlah pemandu yang dapat dipercaya. Ia mulai memperhatikan gerak dengan cara baru. Daripada menerima apa yang tampak, ia membayangkan sebuah eksperimen ideal: sebuah gerobak diletakkan pada jalan yang sangat licin, begitu licin hingga gaya gesek sama sekali tidak ada. Bila gerobak itu didorong sedikit saja, ia tidak akan berhenti; ia akan bergerak terus, tanpa perlambatan, tanpa perlu dorongan tambahan. Gerak itu

bertahan bukan karena ada yang mendorongnya, tetapi justru karena tidak ada yang menghambatnya.

Kita tentu tidak pernah melihat jalan yang benar-benar licin atau roda tanpa gesekan. Namun Galileo menunjukkan bahwa untuk memahami hukum alam, kita perlu membayangkan keadaan ideal yang bersih dari gangguan. Dari bayangan inilah lahir sebuah petunjuk besar, petunjuk pertama yang membuka jalan bagi seluruh mekanika modern.

Dari eksperimen imajinatif itu, Galileo menarik kesimpulan yang berlawanan dengan intuisi kuno. Ia menyimpulkan bahwa kecepatan tidak memberi tahu kita apakah suatu gaya bekerja atau tidak. Bahkan sebuah benda yang tidak disentuh oleh gaya luar akan tetap mempertahankan kecepatannya. Yang menjadi tanda adanya gaya bukanlah kecepatan, melainkan perubahan kecepatan—dalam bentuk percepatan atau perlambatan, atau perubahan arah.

Kesimpulan yang sederhana ini membawa revolusi besar: benda bukan bergerak karena didorong terus-menerus, tetapi benda justru cenderung mempertahankan gerakannya. Ini kelak dirumuskan secara sangat indah oleh Newton sebagai hukum inersia: sebuah benda akan tetap diam atau bergerak lurus berkecepatan tetap selama tidak ada gaya dari luar yang memaksanya mengubah keadaan itu.

Hukum ini begitu asing pada zamannya sehingga membutuhkan keberanian intelektual untuk menerimanya. Namun ia membuka pintu bagi pemahaman baru tentang gerak. Manusia mulai melihat bahwa gerak alami sebuah benda bukanlah berhenti, melainkan berlanjut. Yang membuat benda berhenti hanyalah gangguan dari luar—gesekan, hambatan udara, dan berbagai gaya lain.

Setelah memahami bahwa gaya tidak diukur dari kecepatan, tetapi dari perubahan kecepatan, Galileo melangkah lebih jauh. Ia melihat bahwa bila gerobak yang sedang bergerak diberi dorongan searah gerakan, kecepatannya bertambah; bila dorongannya berlawanan arah, kecepatannya berkurang. Maka gaya bukan penentu gerak, melainkan penentu perubahan gerak. Dengan kata lain: gaya “mengubah,” bukan “mempertahankan.” Inilah inti dari petunjuk pertama.

Dengan petunjuk inilah mekanika klasik mulai dibangun, dan dari sinilah seluruh perjalanan ilmiah menuju Newton, lalu menuju relativitas dan teori modern lainnya, mendapatkan fondasinya. Petunjuk pertama ini tampak kecil, tetapi ia memotong belantara pemikiran kuno dan membuka jalan baru yang akan membawa ilmu pengetahuan menuju pemahaman yang jauh lebih luas.

VEKTOR

Setelah menemukan petunjuk pertama tentang gerak—bahwa gaya tidak ditentukan dari kecepatan, melainkan dari perubahan kecepatan—kita segera menyadari bahwa dunia nyata tidak hanya terdiri dari gerak lurus. Batu yang dilempar melengkung di udara, bulan mengelilingi bumi dalam lingkaran, dan bahkan gerak seekor lalat pun berubah arah setiap saat. Jika kita ingin memahami semua gerak ini, kita membutuhkan bahasa baru yang lebih halus daripada sekadar angka-angka kecepatan.

Di sinilah muncul kebutuhan untuk memandang kecepatan tidak hanya sebagai “berapa cepat,” tetapi juga sebagai “ke mana.” Dalam kehidupan sehari-hari, dua mobil yang masing-masing melaju 40 mil per jam disebut memiliki kecepatan yang sama, meskipun satu melaju ke timur dan satu lagi ke utara. Tetapi bagi fisika, dua gerak ini berbeda secara mendasar. Arah menentukan segala-galanya, terutama ketika kita ingin tahu bagaimana sebuah benda dapat berbelok, mempercepat, atau memperlambat.

Karena itulah fisika menciptakan sebuah cara baru untuk menggambarkan gerak: sebuah panah kecil, digambar pada kertas atau di benak kita, yang menunjukkan arah gerak dan sekaligus besarnya. Panah ini disebut vektor. Panjangnya mewakili besar kecepatan; arah panahnya menunjukkan arah gerakan benda. Dengan satu gambar sederhana, kita dapat menunjukkan sesuatu yang tidak mampu diungkapkan oleh angka semata.

Bayangkan empat mobil meninggalkan sebuah bundaran ke empat arah berbeda, masing-masing dengan kecepatan sama. Bagi fisika, keempat gerak itu tidaklah sama. Kita menggambar

empat panah dengan panjang sama, tetapi masing-masing menunjuk ke arah berbeda. Dalam sekejap, kita dapat “melihat” perbedaan yang sebelumnya tersembunyi dalam kata-kata.

Dengan bahasa vektor inilah kita dapat menggambarkan perubahan kecepatan—yang telah kita pahami sebagai jejak keberadaan gaya. Bila sebuah benda bergerak lurus dan kemudian didorong sedikit, vektor kecepatannya berubah panjang. Bila dorongan itu berlawanan arah, vektor itu pendek kembali. Bila gaya bekerja dari samping, vektor kecepatan akan “berputar,” berubah arah tanpa harus berubah panjang. Dan perubahan kecil inilah yang menjadi kunci untuk membaca gerak melengkung.

Tetapi perubahan ini tidak hanya berlaku untuk gerak lurus. Ia juga menjadi jembatan untuk memahami gerak sepanjang kurva. Bayangkan sebuah titik kecil bergerak di sepanjang jalur melengkung. Pada setiap titik lintasannya, ada sebuah garis khayal bernama tangen, garis yang menyentuh kurva hanya pada titik itu dan memiliki arah yang seolah-olah menjadi “arah sesaat” dari gerak benda. Jika pada saat tertentu semua gaya yang bekerja pada benda itu menghilang secara tiba-tiba, ia akan meninggalkan jalur melengkung itu dan bergerak lurus mengikuti arah tangen. Maka vektor kecepatan saat itu pun harus terletak di sepanjang tangen tersebut.

Untuk mengetahui bagaimana gaya bekerja, kita melihat dua vektor kecepatan yang sangat berdekatan: satu tepat sebelum gaya bekerja, dan satu lagi sesudahnya. Selisih antara keduanya—perubahan kecil itu—menjadi petunjuk arah gaya yang bekerja pada benda. Walaupun perubahan itu mungkin sangat kecil, panah perubahan itu menunjukkan dengan tepat ke mana gaya mengarahkan benda.

Dari sinilah lahir gagasan besar: bahwa gaya dan perubahan kecepatan selalu searah. Gaya adalah panah yang mengubah panah lainnya. Tidak ada cara yang lebih sederhana untuk menggambarkan bagaimana gerak berubah. Dan dengan alat sederhana inilah, manusia mulai dapat membaca rahasia gerak melengkung: dari parabola batu yang dilempar hingga lingkaran yang ditempuh bulan.

Bahasa baru ini—bahasa vektor—menjadi jendela yang memungkinkan kita menatap alam dengan cara yang sama sekali baru. Tanpa bahasa ini, fisika tidak akan pernah dapat memahami revolusi, rotasi, orbit, atau bahkan turbulensi air. Ia menjadi alfabet baru bagi sains, sama pentingnya bagi fisika seperti alfabet latin bagi bahasa yang kita gunakan sehari-hari.

Dengan vektor, mekanika Newton menjadi mungkin. Tanpanya, seluruh bangunan teori tentang gaya dan gerak akan tetap kabur, berdiri di atas intuisi yang keliru, seperti bangunan sebelum Galileo menemukan petunjuk pertamanya.

TEKA-TEKI GERAK

Setelah kita memiliki bahasa baru—bahasa vektor—kita kini dapat menatap persoalan gerak dengan cara yang lebih jernih. Tetapi dunia tidak berhenti pada gerak lurus, dan justru di sanalah teka-teki sesungguhnya mulai muncul. Alam hampir tidak pernah memberi kita gerak lurus yang sempurna; yang kita lihat justru lintasan yang membengkok, melingkar, melonjak, melambat, lalu mempercepat lagi. Gerak sebuah batu, gerak air dalam cerat, gerak planet di langit—semuanya adalah gerak melengkung. Dan selama berabad-abad, gerak melengkung ini tampak seperti misteri yang tak bisa disatukan dalam satu aturan sederhana.

Galileo telah memberi kita petunjuk pertama, tetapi baru pada gerak lurus. Sekarang pertanyaannya adalah: bisakah petunjuk itu diperluas? Dapatkah kita menggunakan konsep kecepatan, perubahan kecepatan, dan gaya untuk memahami gerak yang tidak lagi sederhana, gerak yang membelok di setiap titiknya?

Untuk menjawabnya, kita harus menggunakan imajinasi dengan cara yang mirip seperti Galileo dahulu. Bayangkan sebuah titik kecil yang bergerak sepanjang kurva—lintasan yang tidak lurus, tidak juga berupa lingkaran sempurna, melainkan jalur yang berubah arah setiap saat. Pada momen tertentu, titik itu berada pada satu posisi di kurva, dan kita ingin

mengetahui kecepatan serta perubahan kecepataannya. Dalam gerak lurus hal ini mudah, tetapi bagaimana dengan jalur yang tidak pernah berhenti membelok?

Di sinilah peran tangen kembali menjadi penting. Bila kita melihat kurva dari jarak sangat dekat, begitu dekat hingga lengkungannya hampir tak terlihat, bagian kecil kurva itu tampak seperti garis lurus. Tangen itulah “serpihan lurus” dari kurva, serpihan kecil yang menjadi gambaran arah gerak sesaat. Dengan demikian, vektor kecepatan saat itu harus diletakkan di sepanjang tangen tersebut. Itulah arah yang akan ditempuh benda jika tiba-tiba semua gaya yang mengendalikannya menghilang. Dalam sekejap, ia akan meninggalkan kurva dan bergerak lurus mengikuti garis tangen itu.

Tetapi kenyataan memperlihatkan sesuatu yang berbeda: benda itu tidak meninggalkan kurva. Ia tetap mengikuti lintasannya. Itu berarti gaya masih bekerja, memaksa vektor kecepatan untuk berubah bentuk—kadang memanjang, kadang memendek, kadang berputar sedikit demi sedikit. Setiap belokan, betapapun kecilnya, adalah tanda bahwa gaya sedang bekerja.

Untuk memahami bagaimana gaya itu bekerja, kita membandingkan dua vektor kecepatan yang sangat berdekatan—satu menggambarkan gerak sebelum gaya mengubahnya, dan satu lagi sesudah perubahan terjadi. Selisih halus antara kedua vektor itu—entah ia mengarah ke samping, ke atas, atau ke bawah—menjadi penunjuk arah gaya. Dengan kata lain, perubahan kecil dalam vektor kecepatan adalah “jejak kaki” gaya yang sedang bekerja pada benda itu.

Tentu, perubahan ini begitu kecil sehingga dalam kenyataan sulit dilihat. Tetapi secara konseptual, gambaran ini memberi kita wawasan penting: gerak melengkung bukanlah sesuatu yang misterius. Ia tidak memerlukan “penjaga khusus” yang mengarahkan benda. Ia adalah hasil dari perubahan vektor yang terjadi terus-menerus. Bila perubahan itu selalu mengarah ke bawah, kita melihat parabola batu yang dilempar. Bila perubahan selalu menuju satu titik pusat, kita melihat lingkaran atau orbit bulan. Semua gerak melengkung ternyata hanyalah akumulasi perubahan-perubahan kecil dari vektor kecepatan.

Namun ada sesuatu yang lebih besar lagi yang menanti kita di balik gagasan sederhana ini. Begitu kita menerima bahwa perubahan vektor kecepatan mengungkap arah gaya, kita perlu melangkah satu langkah lebih jauh: berapa besar perubahan itu? Di sinilah Newton akan masuk dengan hukum-hukumnya, tetapi sebelum sampai ke sana, kita harus mengakui bahwa pemahaman ini—pemahaman tentang gerak melengkung melalui perubahan vektor—adalah kunci utama yang membuka pintu menuju seluruh mekanika modern.

Hukum gravitasi, gerak planet, peluru meriam, bahkan ayunan bandul—semuanya dapat dipahami dengan bahasa perubahan vektor ini. Dunia yang tadinya tampak rumit dan tak terduga, kini mulai tersusun rapi, seperti pola indah yang baru terlihat setelah seseorang menemukan kacamata yang tepat. Setiap lengkungan ternyata memiliki alasan, setiap belokan memiliki penyebab, dan setiap gerak dapat dijelaskan melalui hubungan sederhana antara gaya dan perubahan kecepatan.

Dengan demikian, teka-teki gerak yang selama ribuan tahun membingungkan akhirnya menemukan bentuknya. Namun perjalanan mekanika belum berakhir. Setelah memahami

bagaimana gerak lurus dan melengkung bekerja, kita akan sampai pada petunjuk penting berikutnya—sesuatu yang sangat mendasar namun begitu lama terlewat, yaitu tentang massa.

SATU PETUNJUK YANG MASIH TERSISA

Setelah teka-teki gerak mulai terpecahkan melalui bahasa vektor—ketika kita memahami bahwa gaya meninggalkan jejaknya pada perubahan kecepatan—maka mekanika tampak seperti bangunan yang hampir lengkap. Hukum-hukum Newton tumbuh dari petunjuk itu, memberikan kepastian pada prediksi gerak benda, dari batu jatuh hingga orbit planet. Pada titik ini orang merasa bahwa semua unsur dasar dalam mekanika

sudah tertangkap: gaya, percepatan, kecepatan, dan lintasan. Seolah-olah tidak ada lagi misteri yang tersisa.

Namun justru pada saat bangunan itu tampak utuh, sebuah kekosongan kecil mulai terlihat—celah halus yang selama tiga abad tidak diperhatikan siapa pun. Ia tersembunyi begitu rapi dalam konsep yang begitu akrab sehingga tidak ada orang yang mengira bahwa ia menyimpan petunjuk mendalam yang kelak akan mengguncang seluruh fondasi mekanika. Petunjuk itu bernama massa.

Selama ini, massa dianggap sekadar ukuran “berat” atau “banyaknya materi.” Tidak ada yang meragukan maknanya. Kita memakai timbangan, membaca angka, dan selesai. Tetapi mekanika Newton memperlakukan massa dengan cara yang berbeda. Di dalam hukum gerak, massa muncul sebagai sesuatu yang menentukan seberapa sulit sebuah benda mengubah keadaannya—seberapa keras ia “menolak” percepatan. Ini adalah massa inersia, ukuran keengganan benda untuk berubah geraknya.

Untuk melihat perannya, bayangkan kembali gerobak di jalan licin. Bila kosong, satu dorongan kecil saja membuatnya melaju cepat. Tetapi bila gerobak dipenuhi muatan, dorongan yang sama menghasilkan percepatan jauh lebih kecil. Gerakan benda menjadi lamban bukan karena jalannya berubah, bukan karena dorongannya kurang benar, tetapi karena massa inersianya lebih besar. Di sini massa muncul sebagai pengukur kemalasan benda terhadap perubahan.

Namun ada cara lain untuk mengenal massa, cara yang kita gunakan sehari-hari tanpa pernah berpikir panjang. Kita menimbang benda. Benda yang lebih berat akan menekan neraca lebih kuat. Di sini massa tampak sebagai ukuran

seberapa kuat bumi menarik benda itu—sebuah sifat yang sama sekali berbeda dengan “kelembaman gerak.” Massa yang tampil pada timbangan ini disebut massa gravitasi.

Kita hidup begitu lama dengan kedua cara mengenal massa ini—melalui gerak dan melalui berat—sehingga tidak pernah terpikir bahwa keduanya berasal dari prinsip yang sama sekali berbeda. Tetapi keanehan itu baru tampak ketika seseorang bertanya: Apa yang terjadi jika kita menentukan massa sebuah benda dengan kedua cara itu? Apakah hasilnya sama?

Tidak ada alasan teoritis pada masa Newton yang menuntut kedua massa itu sama. Tidak ada hukum matematika yang mengaitkannya. Mereka lahir dari dua fenomena alam yang berbeda: gerak dan gravitasi. Namun ketika diuji, hasilnya mencengangkan: kedua massa itu selalu identik. Massa yang mengatur bagaimana benda bergerak ternyata adalah massa yang sama yang menentukan bagaimana benda itu ditarik oleh bumi.

Fakta ini begitu halus sehingga selama tiga ratus tahun tidak ada yang merasa perlu bertanya mengapa demikian. Dunia menggunakannya, menghitung dengannya, tetapi tidak pernah menggugatnya. Sampai akhirnya, Einstein datang dan melihat sesuatu yang tidak dilihat orang lain: bahwa kesetaraan kedua massa ini bukan kebetulan, bukan kenyamanan matematika, tetapi petunjuk terdalam tentang struktur alam.

Untuk memahami mengapa fakta ini begitu penting, bayangkan Galileo di puncak menara Pisa, menjatuhkan dua benda berbeda. Ia menemukan bahwa keduanya jatuh dengan kecepatan yang sama, terlepas dari beratnya. Dalam bahasa modern kita memahami hal ini begini: bumi menarik benda yang lebih berat dengan gaya lebih besar, tetapi benda yang

lebih berat itu juga memiliki massa inersia lebih besar yang membuatnya “lebih sulit digerakkan.” Kedua efek ini saling meniadakan. Karena massa gravitasi dan massa inersia identik, percepatan jatuh bebas menjadi sama untuk semua benda.

Tetapi bila kedua massa itu tidak sama—even sedikit saja—benda-benda di dunia akan jatuh dengan percepatan berbeda. Batu besar akan jatuh lebih cepat daripada kerikil, dan pena akan jatuh lebih lambat daripada buku. Dunia akan tampak seperti jam rusak—tidak teratur, tidak rapi, tidak tunduk pada hukum sederhana.

Namun kenyataan menunjukkan hal sebaliknya: alam memperlakukan semua benda dengan cara yang sama dalam medan gravitasi. Ini bukan kebetulan; ini adalah struktur terdalam dari alam itu sendiri.

Einstein memandang kesetaraan dua massa ini bukan sebagai fakta tambahan dalam mekanika, tetapi sebagai pintu menuju teori baru tentang gravitasi—teori relativitas umum—di mana gaya tarik bumi tidak lagi dipahami sebagai “gaya,” melainkan sebagai kelengkungan ruang dan waktu. Tetapi pada tahap narasi ini, kita baru menyadari bahwa ada sebuah petunjuk besar yang selama berabad-abad tersembunyi di depan mata: bahwa massa yang membuat benda sulit digerakkan adalah massa yang sama yang menentukan bagaimana ia jatuh.

Sebuah detail kecil yang ternyata membawa kita menuju revolusi pemikiran terbesar abad ke-20.

APAKAH PANAS ITU SUATU ZAT?

Ketika para ilmuwan merasa telah cukup kokoh memahami gerak dan gaya, perhatian mereka perlahan beralih ke salah satu pengalaman paling universal dalam hidup: panas. Setiap orang tahu rasanya panas—kulit kita merasakannya, api memberikannya, dan air mendidih memperlihatkankannya. Namun selama berabad-abad, manusia tidak sungguh-sungguh memahami apa panas itu. Kita merasakannya setiap hari, bahkan sejak lahir, tetapi pemahamannya justru terlambat dibandingkan pemahaman tentang gerak atau gravitasi.

Kesulitan pertama muncul dari anggapan yang sangat alamiah namun menyesatkan: bahwa panas dan suhu adalah hal yang sama. Indera kita membuat kita percaya demikian. Bila sentuhan tangan mengatakan sesuatu itu panas, maka kita menyebut suhu di sana tinggi; bila dingin, berarti suhunya rendah. Tetapi pancaindra ternyata sangat mudah menipu. Seseorang yang mencelupkan satu tangan dalam air panas dan tangan lainnya dalam air dingin, kemudian memasukkan keduanya ke dalam air hangat, akan menemukan bahwa tangan yang tadinya dalam air dingin merasa air itu hangat, sedangkan tangan yang tadinya dalam air panas merasa air itu justru dingin. Dua kesan yang bertolak belakang dari keadaan yang sama membuat orang akhirnya menyadari bahwa suhu tidak dapat diukur dengan perasaan.

Untuk itu manusia menciptakan alat baru: termometer. Ia bekerja dengan prinsip sederhana—bahwa dua benda yang bersentuhan cukup lama akan mencapai suhu yang sama.

Raksa atau cairan lain di dalam tabung naik dan turun mengikuti suhu lingkungan. Ini membantu kita mengukur suhu, tetapi meskipun begitu, thermometers hanya menjelaskan “seberapa panas” sesuatu, bukan apa itu panas.

Di sinilah muncul perbedaan besar antara konsep suhu dan panas. Suhu adalah angka, ukuran tingkat panas; panas adalah sesuatu yang dipindahkan. Dua benda dapat memiliki suhu yang sama, tetapi tidak mengandung panas dalam jumlah yang sama. Serupa dengan dua orang yang sama-sama memiliki uang lima ribu rupiah, tetapi satu menyimpannya dalam satu lembar uang kertas, dan satu lagi dalam bertumpuk koin receh—nilainya sama, tetapi jumlah fisiknya berbeda.

Pemahaman ini terasa abstrak sampai kita memanaskannya menjadi pengalaman nyata. Bila kita memanaskan satu kilogram air, waktu yang diperlukan untuk menaikkan suhunya relatif singkat. Tetapi bila kita memanaskan dua belas kilogram air dengan api yang sama, waktu yang dibutuhkan menjadi jauh lebih lama. Jelas bahwa air memerlukan sesuatu dari api untuk menaikkan suhunya; sesuatu itu tidak terlihat, tetapi dapat ditransfer. Itulah yang disebut panas. Pengalaman sederhana ini mengarahkan manusia pada kesimpulan bahwa panas bukan sekadar “keadaan hangat,” melainkan sesuatu yang dapat diterima oleh sebuah benda.

Dan lebih menarik lagi: bukan hanya jumlah air yang menentukan banyaknya panas yang diperlukan, tetapi juga jenis bahan. Satu kilogram air memerlukan panas jauh lebih banyak untuk naik suhunya dibandingkan satu kilogram raksa. Ini bukan perbedaan sepele, melainkan tanda bahwa setiap bahan mempunyai “kemampuan menyerap panas” yang berbeda, sesuatu yang kini kita sebut panas jenis. Dalam satu

kalimat: suhu mengatakan seberapa panas, tetapi panas mengatakan seberapa banyak energi yang harus diberikan untuk membuat suhu berubah.

Namun pertanyaan terbesar belum terjawab: apa sebenarnya panas itu? Ketika kita menyentuh benda panas dan benda dingin, lalu keduanya kita tempelkan, kita melihat suhu sama-sama berubah hingga mencapai titik perantara.

Seolah-olah sesuatu sedang mengalir dari benda yang lebih panas ke benda yang lebih dingin. Karena pikiran manusia suka mencari analogi fisik yang konkrit, para ilmuwan dulu membayangkan panas sebagai zat halus—sejenis fluida tak terlihat yang bergerak dari satu benda ke benda lain, persis seperti air dari tempat tinggi mengalir ke tempat rendah.

Gambaran ini tampak masuk akal pada masanya. Banyak fenomena dapat dijelaskan dengannya: api “memberi” panas, logam “menyimpan” panas, air dingin “mengambil” panas dari tangan kita. Seluruh proses dapat dibayangkan sebagai perpindahan zat halus bernama kalorik. Meski keliru, gagasan ini membantu banyak ilmuwan melakukan eksperimen dan menata pikirannya.

Tetapi lambat laun celah besar muncul. Bila panas adalah zat, dari manakah zat itu muncul ketika kita menggosok dua benda hingga panas? Dua batang logam yang sama-sama dingin, ketika digesek, tiba-tiba menjadi panas. Apakah zat panas tercipta begitu saja? Bukankah jika panas adalah zat, ia seharusnya mengikuti hukum kekekalan: tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan? Pertanyaan ini semakin mengganggu ketika ternyata panas hasil gesekan tampaknya tidak terbatas. Selama kita terus menggosok, panas terus muncul, seolah-olah kita menciptakan zat dari ketiadaan.

Dari sini perlahan-lahan menjadi jelas bahwa teori panas sebagai zat tidak dapat bertahan. Ada sesuatu yang bekerja di balik panas, sesuatu yang lebih mendasar dari sekadar gambaran fluida halus. Para ilmuwan pada akhirnya mencurigai bahwa panas mungkin bukan zat, melainkan gerakan—gerak yang terlalu kecil untuk dilihat. Mungkin panas adalah tarian tak terlihat dari partikel-partikel materi.

Namun sebelum gagasan baru itu benar-benar diterima, manusia harus melewati masa panjang di mana panas dibayangkan sebagai sesuatu yang dapat mengalir, seperti air atau minyak. Walau salah, gambaran ini membantu menyiapkan panggung bagi pemahaman yang benar: bahwa panas adalah bagian dari dunia energi, bukan bagian dari dunia zat.

Dan pada titik inilah, narasi memasuki tikungan tajam berikutnya. Sebuah perubahan arah yang akan menghubungkan panas, kerja mekanis, dan dalam jangka panjang, struktur terdalam materi. Fisika akan segera menemukan bahwa apa yang selama ini dianggap “zat panas” adalah sesuatu yang sama sekali lain—dan jawabannya, ketika tiba, akan membawa revolusi.

TITIK BALIK PEMIKIRAN

Setelah kita mengikuti perjalanan panjang manusia memahami panas—dari sentuhan tangan, ke termometer, hingga gagasan panas sebagai zat halus—kita tiba pada sebuah tikungan tajam, sebuah perubahan arah pemikiran yang tidak terduga. Para ilmuwan dahulu mengira bahwa panas adalah sejenis materi tak terlihat yang dapat berpindah dari satu benda ke benda lain. Tetapi semakin banyak eksperimen dilakukan, semakin terasa bahwa gambaran itu mulai goyah. Begitu banyak fenomena yang tidak dapat dijelaskan hanya dengan menganggap panas sebagai cairan yang mengalir.

Pada masa itu, dunia sains mengalami guncangan yang mirip dengan saat Galileo membongkar intuisi lama tentang gerak. Sekali lagi manusia harus memilih: bertahan pada gagasan yang nyaman namun sempit, atau melompat ke pemahaman baru yang lebih berani dan jauh lebih sulit dibayangkan. Inilah tikungan itu—*the switchback*—tempat pemikiran ilmiah berbelok menuju arah yang sama sekali lain.

Salah satu pukulan terbesar terhadap gagasan panas sebagai zat datang dari percobaan sederhana namun mengagumkan: menggosokkan dua benda hingga panas. Bayangkan sebuah batang logam dan sepotong kayu. Ketika keduanya digesekkan, keduanya menjadi panas, meskipun sebelumnya sama sekali tidak memiliki “cadangan panas tambahan.” Jika panas memang zat, dari mana zat itu tiba-tiba muncul? Apakah ia tercipta begitu saja? Ataukah ia keluar dari tempat persembunyian misterius yang belum pernah dipikirkan?

Tentu saja sulit menerima bahwa panas bisa muncul tanpa batas. Tetapi pengamatan terus berulang: gesekan selalu menghasilkan panas, dalam jumlah yang tampaknya tak terbatas selama kita terus menggosok. Dari sinilah muncul kecurigaan bahwa panas bukan zat, melainkan sesuatu yang timbul dari gerakan—gerakan yang terlalu kecil untuk dilihat, tetapi nyata adanya. Pikiran ini, walaupun baru berupa firasat pada masa itu, nantinya akan menjadi jembatan menuju teori kinetik, tempat panas akhirnya dipahami sebagai gerak acak partikel-partikel kecil penyusun materi.

Namun sebelum sampai ke sana, para ilmuwan menemukan hubungan lain yang jauh lebih mengejutkan: hubungan antara panas dan kerja mekanis. Eksperimen demi eksperimen menunjukkan bahwa bila kita melakukan kerja—mengangkat

beban, memutar roda, atau menggosok dua benda—kita dapat menimbulkan panas. Sebaliknya, panas dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja, seperti yang terlihat dalam mesin uap. Dunia tampaknya tunduk pada aturan pertukaran: tenaga mekanis dapat berubah menjadi panas, dan panas dapat berubah menjadi tenaga mekanis.

Perubahan cara pandang ini sangat besar sehingga bagi ilmuwan masa itu, seolah-olah mereka dipaksa meninggalkan jalan lurus yang nyaman dan memasuki jalur pegunungan penuh tikungan tajam, di mana setiap belokan membuka pemandangan yang belum pernah dibayangkan. Mereka mulai melihat bahwa panas tidak lagi dapat dipahami sebagai zat yang bergerak dari satu tempat ke tempat lain, melainkan sebagai bentuk energi—sesuatu yang dapat lahir dari kerja dan sebaliknya menghasilkan kerja.

Dan di sinilah, pada titik perubahan ini, mereka mulai menyadari bahwa alam semesta mungkin tidak terdiri dari berbagai jenis “zat” atau “fluida halus,” tetapi dari berbagai bentuk energi yang dapat berubah satu menjadi yang lain. Pandangan ini perlahan-lahan meresap ke dalam kesadaran ilmiah, mengubah cara manusia membaca “buku alam,” sama seperti gagasan Galileo dahulu mengganti cara manusia memahami gerak.

KECEPATAN PERTUKARAN

Begitu para ilmuwan menerima gagasan bahwa panas dan kerja saling dapat ditukar, mereka dihadapkan pada pertanyaan baru yang tak kalah penting: berapa besar nilai pertukaran itu? Berapa banyak panas yang dihasilkan oleh sejumlah kerja tertentu? Atau sebaliknya, berapa banyak kerja yang dapat dilakukan oleh sejumlah panas?

Pertanyaan ini tidak lagi hanya bersifat kualitatif. Seperti halnya dalam mekanika, di mana kita tak puas hanya mengetahui bahwa gaya mengubah gerak tetapi ingin mengetahui *berapa besar* perubahan itu, demikian pula dalam teori panas: manusia ingin tahu hubungan kuantitatif antara kerja dan panas.

Seperti pedagang yang mencoba memahami harga barang di pasar, ilmuwan mencoba mengetahui “nilai tukar” antara panas dan kerja. Salah satu tokoh yang sangat berjasa dalam penyelidikan ini adalah Joule. Dengan ketekunan yang hampir tanpa tanding, ia melakukan serangkaian percobaan yang tampaknya sederhana namun membutuhkan ketelitian luar biasa. Dalam percobaannya yang terkenal, ia menggunakan pemberat jatuh untuk memutar dayung kecil di dalam air. Ketika pemberat turun, ia melakukan kerja; dayung berputar, air beraduk, dan suhu air naik. Dari sini Joule menghitung berapa banyak kerja mekanik yang harus dilakukan untuk menghasilkan satu kenaikan suhu tertentu.

Hasilnya menakjubkan: selalu terdapat hubungan tetap antara kerja yang dilakukan dan panas yang dihasilkan. Tidak peduli alatnya, tidak peduli caranya, jumlah kerja tertentu selalu menghasilkan jumlah panas yang sama. Ini adalah temuan besar—sebuah hukum alam yang memperkuat gagasan bahwa panas dan kerja hanyalah dua wajah dari suatu hakikat tunggal: energi.

Dengan demikian, dunia sains memantapkan pemahaman baru: energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Konsep ini, yang kini kita sebut sebagai hukum kekekalan energi, mengakhiri era panjang kebingungan tentang panas dan membuka babak baru dalam pemahaman tentang alam.

KERANGKA FILOSOFIS

Setelah berbagai penemuan tentang gerak, gaya, panas, dan energi, dunia sains memasuki masa baru yang lebih dalam—masa ketika manusia mulai memikirkan *apa sebenarnya* yang terjadi di balik semua hukum itu.

Hukum-hukum baru yang dirumuskan Galileo, Newton, dan Joule tampak sangat kuat; mereka memungkinkan kita memprediksi gerak planet, laju jatuhnya batu, dan bahkan hubungan antara kerja serta panas. Sains tampak seperti bangunan besar yang berdiri tegak di atas fondasi kokoh. Namun semakin tinggi bangunan itu menjulang, semakin banyak pertanyaan yang muncul tentang dasar-dasarnya.

Para ilmuwan mulai menyadari suatu hal yang sebelumnya jarang dipikirkan: hukum-hukum fisika bukanlah potongan kebenaran mutlak yang jatuh dari langit, melainkan hasil ciptaan pikiran manusia, upaya kita untuk menafsirkan alam. Bukan berarti hukum itu tidak benar—melainkan bahwa ia lahir dari pilihan, dari cara kita menyederhanakan dunia yang jauh lebih rumit daripada gambaran yang dapat ditangkap oleh persamaan apa pun. Alam tidak pernah berkata, “Saya

menggunakan hukum Newton.” Kitalah yang memilih hukum itu karena cocok dengan pengamatan dan memudahkan kita membaca fenomena.

Untuk pertama kalinya, fisika klasik mulai memandang dirinya sendiri, bertanya bagaimana ia bekerja, apa batas-batasnya, dan sejauh mana konsep-konsep seperti gaya, massa, atau energi benar-benar menggambarkan kenyataan. Inilah latar filosofis yang melingkupi sains abad ke-19: keyakinan kuat pada ketertiban alam semesta, tetapi juga kesadaran bahwa ketertiban itu mungkin tidak tunggal dan tidak final.

Di dalam suasana intelektual itu, muncullah tanda-tanda keretakan kecil pada bangunan mekanistik yang selama dua abad dianggap sempurna. Keretakan itu belum dianggap serius pada awalnya, namun perlahan-lahan tampak semakin jelas. Ada pertanyaan-pertanyaan baru yang tidak bisa dijawab oleh mekanika klasik, dan ada fenomena yang tampaknya memerlukan cara pandang yang sama sekali berbeda.

Salah satu petunjuk pertama menuju perubahan besar itu datang dari suatu gagasan yang tampak sederhana namun revolusioner: gagasan bahwa materi terdiri dari partikel-partikel kecil yang senantiasa bergerak.

TEORI GERAK MATERI

Gagasan bahwa semua benda tersusun dari partikel kecil bukanlah hal baru—filsuf Yunani seperti Demokritos telah mengusulkannya dua ribu tahun sebelumnya. Namun pada zaman itu gagasan tersebut hanya bersifat spekulatif; manusia tidak memiliki alat atau teori yang cukup kuat untuk membuktikannya. Barulah pada abad ke-19, gagasan ini bangkit kembali, kali ini bukan sebagai dugaan filosofis, tetapi sebagai teori ilmiah yang dapat diuji.

Segalanya berawal dari pemahaman baru tentang panas. Setelah panas tidak lagi dianggap sebagai zat, dan justru dipahami sebagai sesuatu yang berhubungan dengan gerakan, muncullah ide keberanian: mungkin panas sebenarnya adalah gerak acak partikel-partikel kecil penyusun materi. Bila sebuah benda dipanaskan, mungkin bukan karena ia “dipenuhi panas,” tetapi karena partikel-partikelnya bergerak lebih cepat dan lebih liar.

Jika demikian, sifat-sifat makroskopis seperti suhu, tekanan, atau bahkan keadaan benda (padat, cair, gas) bukanlah kualitas yang berdiri sendiri, tetapi hasil rata-rata dari tarian tak

terlihat jutaan partikel. Tekanan gas, misalnya, bukan karena gas “menekan” secara misterius, melainkan karena partikel-partikel gas memukul-mukul dinding wadah dengan kecepatan tinggi.

Gagasan ini bukan hanya puitis, tetapi juga luar biasa kuat. Dengan memandang panas sebagai gerak partikel, para ilmuwan mampu menjelaskan banyak fenomena yang sebelumnya membingungkan. Mereka dapat memahami mengapa gas mengembang saat dipanaskan, mengapa udara dapat dikompresi, mengapa bahan yang berbeda memiliki panas jenis berbeda. Dunia yang sebelumnya tampak penuh zat-zat misterius tiba-tiba dapat dijelaskan dengan satu gambaran sederhana: semua terdiri dari partikel yang bergerak.

Namun teori kinetik materi bukan hanya penjelasan mekanis tentang panas; ia adalah salah satu pintu ke arah revolusi besar fisika tahun 1900-an. Melalui teori inilah muncul pemahaman bahwa dunia mikro tidak selalu patuh pada hukum-hukum klasik; ia memiliki aturan sendiri yang jauh lebih aneh dan menantang. Ketika para ilmuwan mencoba menembus lebih dalam ke gerak partikel yang paling kecil, mereka menemukan fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh mekanika Newton. Jalan itu kelak akan membawa kita ke relativitas, ke kuantum, dan ke perubahan radikal dalam gambaran alam semesta.

Tetapi pada tahap ini dalam narasi Einstein dan Infeld, teori kinetik hadir sebagai pencapaian besar dari pandangan mekanistik. Ia menunjukkan kekuatan pendekatan itu, tetapi sekaligus menandai batas-batasnya. Pandangan mekanistik tampak begitu berhasil, namun semakin dalam ia menjelaskan

dunia mikro, semakin banyak tanda bahwa ia tidak dapat bertahan selamanya.

BAB II

RUNTUHNYA PANDANGAN MEKANISTIK

DUA JENIS FLUIDA LISTRIK

Ketika para ilmuwan mulai merasa nyaman dengan pandangan mekanistik—ketika dunia tampak dapat dijelaskan oleh massa, gaya, dan gerak—tiba-tiba muncul serangkaian gejala baru

yang tidak dapat diterangkan dengan bahasa lama itu. Gejala-gejala ini muncul dari dunia listrik dan magnet, dunia yang pada awalnya dianggap aneh, berbahaya, bahkan sedikit magis. Namun perlahan-lahan dunia yang misterius itu mulai menuntut perhatian serius, karena ia tidak tunduk pada mekanisme sederhana yang telah begitu sukses menjelaskan gerak planet dan tarikan gravitasi.

Pada masa itu, listrik bukanlah hal yang akrab. Ia datang dalam bentuk percikan pada musim dingin, kejutan kecil bila seseorang menyentuh logam, atau fenomena petir yang dahsyat di langit. Tidak ada mesin listrik, tidak ada baterai praktis, tidak ada kabel. Hanya percobaan-percobaan sederhana dengan batang kaca dan batang resin, kain wol, dan serpihan-serpihan kecil yang bergerak. Namun justru dalam percobaan yang paling sederhana itulah dunia listrik pertama kali menunjukkan dirinya.

Bayangkan seseorang menggosok batang kaca dengan sepotong kain sutra. Setelah beberapa detik, serpihan kertas kecil di dekatnya bergerak, melompat, seolah-olah tertarik oleh batang itu. Tetapi ketika batang resin digosok dengan bulu, serpihan-serpihan itu justru menunjukkan perilaku yang berbeda. Para eksperimen awal menyadari bahwa ada dua jenis efek listrik, dua jenis “daya tarik” yang muncul dari cara berbeda dalam menggosok benda.

Karena dunia ilmiah pada waktu itu terbiasa mencari penjelasan mekanistik, mereka segera mencoba memahami fenomena baru ini melalui cara lama: dengan membayangkan adanya zat yang bergerak dan berpindah. Jika panas bisa dibayangkan sebagai zat halus bernama kalorik, maka tidak sulit membayangkan bahwa listrik pun mungkin terdiri dari zat

halus lain. Seperti air yang dapat dituang dari satu bejana ke bejana lain, listrik dibayangkan sebagai fluida tak terlihat yang mengisi benda-benda tertentu.

Namun para ilmuwan segera menyadari bahwa satu fluida saja tidak cukup. Ketika batang kaca dan batang resin diuji, keduanya ternyata menghasilkan gaya yang berlawanan. Ada gaya tarik dan ada gaya tolak; ada efek yang tampaknya “positif” dan ada yang “negatif.” Untuk menjelaskan dua sifat yang saling berlawanan ini, lahirlah gagasan bahwa alam memiliki dua fluida listrik: satu disebut *positif*, dan satu lagi *negatif*. Setiap kali suatu benda digosok, ia dianggap kehilangan salah satu fluida dan mendapatkan fluida yang lain.

Gagasan ini tampak memuaskan pada masanya. Ia memberikan cara sederhana untuk memahami mengapa dua benda yang “sejenis” saling menolak, dan dua benda yang “berbeda” saling menarik. Jika sebuah benda memiliki kelebihan fluida positif, dan benda lain kelebihan fluida negatif, keduanya akan saling mendekat. Tetapi jika keduanya kelebihan fluida yang sama, mereka akan saling menjauh. Dunia listrik tampak dapat dijelaskan seperti dua jenis cairan yang mengalir dalam pipa-pipa kecil, bertemu dan saling menetralkan, atau menekan satu sama lain.

Tetapi seperti semua teori yang lahir dari keterbatasan pengamatan, teori dua fluida ini hanya mampu menjelaskan sebagian kecil dari kenyataan. Ia bersandar pada gambaran yang sebenarnya hanya metafora: sebuah fluida halus yang mengalir ke sana kemari. Namun pada waktu itu, tidak ada cara lain yang lebih baik. Dunia listrik masih misteri gelap, dan dua fluida itu menjadi lentera kecil yang membantu manusia mengambil langkah pertama.

Di laboratorium-laboratorium kecil di Eropa, para ilmuwan melihat fenomena yang tampak serupa, walaupun sangat berbeda pada intinya. Mereka melihat bahwa listrik dapat “mengalir” melalui kawat, tetapi juga dapat “terkumpul” pada permukaan benda seperti pada bola logam. Mereka melihat bahwa muatan listrik dapat melompat sebagai percikan, tetapi juga dapat menarik atau menolak tanpa bersentuhan. Semuanya tampak seperti permainan dua zat yang selalu bergerak saling kejar, tetapi setiap pengamatan baru seakan memberi isyarat bahwa apa yang mereka lihat bukanlah fluida, melainkan sesuatu yang lebih abstrak, lebih halus, dan mungkin sama sekali bukan zat.

Dalam kebingungan itu, teori dua fluida tetap bertahan karena memberikan rasa stabilitas—setidaknya ada penjelasan. Namun seiring waktu, ia justru menjadi beban. Ia memberi kesan bahwa listrik adalah sesuatu yang dapat ditampung, dituangkan, dipisahkan, atau dicampurkan. Dunia listrik dipaksa masuk ke dalam kerangka mekanistik lama, meskipun semakin tampak bahwa ia tidak cocok.

Dan di sinilah awal mula keruntuhan pandangan mekanistik: untuk pertama kalinya, manusia berhadapan dengan gejala alam yang tidak tunduk pada gambaran partikel dan gaya mekanis. Dunia listrik, dengan tarikannya yang misterius dan sifatnya yang tidak terlihat, mulai menunjukkan bahwa alam mungkin bekerja dengan cara yang tidak bisa dijelaskan hanya dengan “fluida” atau “partikel yang saling dorong.”

Dalam arti tertentu, teori dua fluida adalah peringatan halus dari alam: bahwa tidak semua fenomena dapat dipaksa mengikuti hukum mekanika klasik. Cahaya, listrik, dan magnet segera akan menyatukan diri dalam gambaran

baru—gambaran medan—yang akan menghancurkan kepercayaan lama bahwa dunia adalah mesin raksasa yang bekerja dengan dorongan dan tumbukan.

Tetapi sebelum gambaran itu lahir, para ilmuwan harus lebih dulu melalui masa panjang kebingungan, di mana dua fluida listrik menjadi penjelasan sementara yang menenangkan tetapi tidak memadai. Dunia seakan menahan napas, menunggu lahirnya pemahaman baru yang akan mengubah segalanya.

FLUIDA MAGNETIK

Setelah para ilmuwan berusaha memahami listrik dengan cara membayangkannya sebagai dua fluida halus, mereka pun mulai melihat kemiripan antara listrik dan magnet. Keduanya tampak memiliki gejala tarik-menarik dan tolak-menolak. Jika dua fluida listrik dapat menjelaskan mengapa batang kaca dan batang resin menunjukkan efek berbeda, mungkin dunia magnet pun bekerja dengan prinsip yang sama. Setidaknya begitulah dugaan awal.

Magnet sudah dikenal manusia jauh sebelum listrik. Orang-orang kuno sudah mengetahui bahwa batu “magnetit” dapat menarik besi, dan bahwa jarum yang digantung bebas selalu menunjuk ke arah tertentu. Ada sesuatu yang misterius yang memancar dari magnet, sesuatu yang tidak terlihat, namun cukup kuat untuk menggerakkan benda dari kejauhan. Pada zaman mekanistik, ketika segala fenomena ingin dijelaskan melalui gaya-gaya langsung antar benda, magnet tampak sebagai teka-teki besar. Tidak ada sentuhan, tidak ada perantara, namun benda dapat bergerak. Ini sangat mengganggu pola pikir lama.

Oleh karena itu, untuk menghilangkan misteri itu, ilmuwan mengandalkan imajinasi yang sama seperti yang digunakan untuk listrik: mereka membayangkan bahwa magnet pun memiliki fluida, bukan satu tetapi dua, serupa tetapi berbeda dari fluida listrik. Ujung magnet yang kita kenal sebagai “kutub utara” dianggap dipenuhi salah satu fluida, sedangkan ujung yang dikenal sebagai “kutub selatan” dipenuhi fluida lainnya.

Dua fluida ini, seperti pada kasus listrik, saling tarik dan saling tolak dalam pola yang sangat teratur. Fluida yang sama saling menjauh, fluida yang berbeda saling mendekat.

Dengan gambaran itulah, magnet dianggap dapat dijelaskan secara mekanistik. Jika dua magnet didekatkan, kutub-kutubnya seolah mengandung cairan yang saling berinteraksi. Bila dua utara didekatkan, cairan yang sama mendorong satu sama lain sehingga magnet saling menjauh. Bila utara dipertemukan dengan selatan, cairan yang berlawanan menyatu dan saling tarik. Dunia magnet tampak seperti permainan dua cairan yang bergerak di sepanjang logam, sama seperti listrik dalam percobaan sederhana dengan batang kaca.

Namun semakin lama para ilmuwan mengamati magnet, semakin besar rasa tidak enak yang muncul. Teori dua fluida magnet tampak seperti tambalan sementara, sebuah gambaran yang menenangkan tetapi semakin lama semakin sulit dipertahankan. Magnet tidak pernah memperlihatkan pemisahan fluida seperti listrik. Kita dapat menggosok batang kaca untuk memunculkan “lebih banyak fluida positif,” tetapi kita tidak dapat memisahkan kutub magnet. Tidak peduli bagaimana kita memotong magnet, seberapa kecil pun potongan itu, ia selalu memiliki dua kutub. Tak ada cara untuk membuat magnet yang hanya memiliki kutub utara atau hanya kutub selatan.

Fenomena ini jelas-jelas menolak gagasan tentang fluida yang dapat dipindahkan atau dialirkan. Jika magnet memiliki fluida yang dapat bergerak bebas, tentu kita bisa mengumpulkannya di satu ujung, memisahkannya, atau setidaknya memotong magnet menjadi dua dan membuat satu potongan hanya

memiliki satu jenis fluida. Namun alam berkata lain: setiap potongan magnet selalu mengandung dua kutub, seolah-olah kedua kutub itu bukan zat yang berpindah, melainkan sifat mendasar yang tidak dapat dilepaskan dari materi itu sendiri.

Di titik ini, teori fluida magnet mulai terlihat rapuh. Ia tidak mampu menjelaskan apa yang sebenarnya terjadi. Namun karena belum ada teori yang lebih baik, ia tetap bertahan—didorong lebih oleh keinginan manusia untuk memahami daripada oleh kesesuaian dengan kenyataan. Dunia listrik dan magnet perlahan-lahan memaksa manusia mengakui bahwa penjelasan mekanistik, dengan fluida halus atau zat tersembunyi, tidak lagi cukup.

Tetapi justru kegagalan teori fluida ini yang membuka jalan bagi sesuatu yang jauh lebih besar. Ketika ilmuwan seperti Oersted dan Ampère menemukan hubungan mengejutkan antara listrik dan magnet—bahwa arus listrik dapat menghasilkan efek magnet, dan magnet dapat mempengaruhi gerak muatan listrik—pandangan lama tentang dua jenis fluida mulai runtuh. Sesuatu yang lebih dalam sedang bekerja, sesuatu yang tidak dapat digambarkan sebagai zat, cairan, atau partikel yang mendorong satu sama lain. Yang mulai terlihat samar-samar adalah ide tentang medan, ide yang pada akhirnya akan menghancurkan mekanika lama dan membuka jalan menuju elektromagnetisme Maxwell.

Namun sebelum sampai ke sana, dunia sains masih harus mengalami satu kebingungan besar berikutnya: bahwa listrik dan magnet bukan hanya “mirip,” bukan hanya “berkaitan,” tetapi dua aspek dari satu fenomena yang sama. Dan untuk memahami itu, teori fluida harus ditinggalkan.

KESULITAN SERIUS PERTAMA

Setelah lama bergulat dengan gagasan tentang dua fluida listrik dan dua fluida magnet, para ilmuwan merasa telah memiliki penjelasan yang cukup rapi untuk semua gejala listrik dan magnet yang dikenal pada masa itu. Mereka mengira telah menemukan semacam “bahasa universal” untuk kedua fenomena tersebut: muatan listrik digambarkan sebagai fluida yang dapat dipindahkan, sementara magnet digambarkan sebagai fluida yang selalu terikat dalam pasangan kutub. Gagasan ini tidak sempurna, tetapi cukup memberi rasa aman. Seakan-akan kedua dunia itu—listrik dan magnet—dapat dijelaskan dalam kerangka mekanistik yang sama yang sebelumnya sukses menjelaskan gerak dan panas.

Namun rasa aman itu tidak bertahan lama. Justru ketika teori tampak stabil, gangguan besar datang dari suatu tempat yang tidak diduga: perjumpaan antara listrik dan magnet. Sampai titik ini, keduanya dianggap dunia yang terpisah. Listrik memiliki

fluida positif dan negatif; magnet memiliki fluida utara dan selatan. Tidak ada alasan untuk menghubungkan keduanya, kecuali bahwa keduanya “menarik dan menolak.” Tetapi itulah titik pertama munculnya masalah serius. Jika dua fenomena tampak serupa, apakah mungkin sebenarnya mereka bukan dua hal berbeda, melainkan bagian dari satu kenyataan yang sama?

Kesulitan besar itu muncul ketika Hans Christian Oersted melakukan percobaan yang sekarang dianggap salah satu momen paling penting dalam sejarah fisika. Ia memperhatikan sebuah jarum kompas yang ditempatkan dekat kawat penghantar listrik. Begitu arus listrik mengalir, jarum kompas itu bergerak, seolah-olah kawat tersebut tiba-tiba berubah menjadi magnet. Ketika arus dihentikan, jarum kembali ke posisi semula. Ini bukan hanya kejutan—ini adalah pukulan telak bagi teori fluida.

Sebab bagaimana mungkin sebuah fluida listrik mengalir dalam kawat dan menyebabkan perubahan pada magnet yang berada di dekatnya? Apa hubungan fluida positif dan negatif dengan kutub utara dan selatan magnet? Tidak ada versi apa pun dari teori fluida yang dapat menjelaskan hal ini tanpa menambah asumsi-asumsi baru yang semakin rumit dan makin jauh dari kesederhanaan ilmiah.

Para ilmuwan mencoba memperbaiki teori dua fluida dengan berbagai cara. Mereka menambahkan aturan, memperkenalkan skema interaksi baru, dan mencoba menyusun gambar-gambar mekanis yang menjembatani listrik dan magnet. Namun setiap langkah untuk memperbaiki teori justru membuatnya tampak lebih buruk. Bukannya semakin jelas, penjelasan itu menjadi semakin rumit, seperti pakaian

lama yang terus ditambah sampai akhirnya bentuk aslinya tidak lagi dikenali.

Kesulitan serius itu bukan sekadar bahwa teori fluida gagal memberi penjelasan yang meyakinkan, tetapi bahwa fenomena baru ini menunjukkan bahwa praktik berpikir mekanistik itu sendiri mulai retak. Jika listrik bisa “menghasilkan” magnet, dan magnet bisa mempengaruhi listrik, maka keduanya tidak mungkin merupakan dua fluida yang berbeda. Tidak mungkin dua zat berbeda saling menciptakan satu sama lain. Sesuatu yang lebih dalam sedang terjadi, sesuatu yang tidak dapat dijelaskan oleh gagasan tentang zat yang berpindah melalui benda.

Oersted pada dasarnya menunjukkan bahwa listrik dan magnet adalah fenomena yang tidak dapat dipisahkan. Tetapi teori fluida membayangkan keduanya sebagai entitas yang berdiri sendiri. Maka ketika kenyataan menunjukkan hubungan yang begitu kuat di antara keduanya, teori itu berada dalam posisi mustahil: ia harus menjelaskan persatuan dua hal yang sejak awal dianggap sepenuhnya terpisah.

Inilah kesulitan serius pertama yang benar-benar mengguncang dasar pandangan mekanistik. Ia bukan sekadar masalah teknis, tetapi masalah konseptual: mekanika klasik membayangkan dunia sebagai tempat benda saling memengaruhi melalui dorongan atau aliran zat. Tetapi hubungan antara listrik dan magnet tampak tidak bekerja seperti itu. Pengaruh itu terjadi bukan melalui tabrakan atau aliran fluida, tetapi melalui sesuatu yang seakan-akan memenuhi ruang itu sendiri—sesuatu yang tidak dapat dilihat, tetapi jelas dapat dirasakan efeknya.

Itu adalah awal dari lahirnya gagasan medan. Sebuah gagasan yang pada akhirnya akan sepenuhnya menggantikan teori fluida dan mengubah wajah fisika. Namun pada tahap narasi ini, yang penting adalah bahwa teori fluida listrik dan magnet mengalami pukulan pertamanya yang sangat serius, sebuah pukulan yang menunjukkan bahwa dunia tidak bekerja dengan mekanisme sederhana seperti yang dibayangkan oleh fisika klasik.

Kesulitan ini bukanlah akhir, melainkan awal dari runtuhnya seluruh pandangan lama. Setelah ini, ilmuwan akan menemukan lebih banyak gejala yang tidak dapat disatukan dalam kerangka mekanistik, sampai akhirnya lahirlah konsep-konsep baru yang sama sekali berbeda dari apa yang dibayangkan Newton.

KECEPATAN CAHAYA

Setelah para ilmuwan mulai meninggalkan gagasan tentang fluida listrik dan magnet—setelah hubungan misterius antara arus listrik dan jarum kompas tidak lagi bisa dijelaskan oleh mekanika lama—mereka berhadapan dengan fenomena lain yang lebih membingungkan: cahaya. Selama ribuan tahun cahaya dianggap sesuatu yang berbeda sama sekali dari listrik dan magnet. Cahaya dihubungkan dengan penglihatan, dengan mata, dengan warna, bahkan dengan filsafat tentang kejelasan dan kebenaran. Tidak ada yang menyangka bahwa cahaya, listrik, dan magnet kelak akan menjadi bagian dari satu struktur yang sama.

Pada awal abad ke-19, cahaya sudah mulai dipahami sebagai gelombang. Seperti gelombang air atau gelombang suara, cahaya dianggap memiliki panjang gelombang, frekuensi, dan dapat mengalami interferensi. Ini berarti cahaya bukanlah aliran partikel kecil sebagaimana dulu dibayangkan Newton, tetapi sesuatu yang bergetar. Tetapi sebuah pertanyaan besar segera muncul: gelombang cahaya bergetar di dalam apa?

Gelombang suara merambat melalui udara. Gelombang air merambat di permukaan laut. Gelombang pada tali merambat melalui serat tali itu sendiri. Namun ruang hampa—kosong, tidak berisi apa pun. Jika cahaya merambat melalui ruang, maka mesti ada “sesuatu” yang mengisi ruang, sesuatu yang dapat bergetar tetapi tidak dapat dilihat. Para ilmuwan menamai sesuatu itu eter.

Eter dianggap sebagai medium halus yang memenuhi seluruh alam semesta. Ia tidak mempunyai massa, tidak dapat dilihat, tidak dapat disentuh, tidak dapat ditangkap, tetapi ia adalah tempat gelombang cahaya bergerak. Dengan model eter inilah kecepatan cahaya—yang luar biasa besar—dicoba untuk

dipahami. Cahaya menempuh sekitar 300.000 kilometer per detik, tetapi tidak ada yang bertanya bagaimana medium selembut itu bisa menggetarkan dirinya dengan kecepatan yang begitu fantastis.

Sampai pada titik ini, pandangan mekanistik masih bertahan: cahaya adalah getaran dalam medium halus yang memenuhi ruang, medium yang memiliki sifat-sifat mekanis tertentu. Namun ketegangan mulai terasa ketika pertanyaan besar kembali muncul: seberapa cepat cahaya itu benar-benar bergerak? Dan lebih penting lagi: apakah kecepatannya tergantung pada gerak pengamat atau sumber cahaya?

Bila sebuah kapal bergerak melawan angin, ia merasakan hembusan angin yang lebih kuat. Bila ia bergerak searah angin, ia merasakan angin yang lebih lemah. Pengalaman sehari-hari membuat kita percaya bahwa kecepatan suatu gelombang pasti bergantung pada gerak pengamat relatif terhadap medium gelombang itu. Jika eter benar mengisi ruang, maka bumi yang bergerak mengelilingi matahari seharusnya “melalui” eter, dan karenanya cahaya yang datang dari arah tertentu harus tampak sedikit lebih cepat atau lebih lambat, tergantung arah gerak bumi.

Dengan keyakinan inilah para ilmuwan mencoba mengukur perubahan kecil pada kecepatan cahaya. Mereka berharap melihat perbedaan halus tetapi pasti, sesuatu yang mirip seperti merasakan angin lebih kencang bila berlari ke arah badai. Percobaan yang paling terkenal dan paling teliti dilakukan oleh Michelson dan Morley. Dengan alat yang sangat sensitif, mereka mencoba mendeteksi perubahan kecepatan cahaya akibat gerak bumi dalam “angin eter”.

Namun hasilnya membuat dunia terdiam: tidak ada perubahan sama sekali.

Kecepatan cahaya selalu sama—tak peduli arah pengukuran, tak peduli waktu dalam setahun, tak peduli bagaimana bumi bergerak.

Hasil ini adalah pukulan keras bagi seluruh pandangan mekanistik. Jika cahaya benar-benar bergerak dalam medium bernama eter, maka seharusnya ada efek angin eter, sama seperti angin terasa lebih kencang saat kita berlari. Tetapi percobaan itu tidak menemukannya. Bumi tampaknya bergerak dalam ruang, tetapi ruang tidak memberikan tanda keberadaan medium apa pun.

Secara perlahan, muncul kebenaran mengejutkan: kecepatan cahaya bersifat mutlak.

Ia tidak mengikuti aturan kecepatan mekanik. Ia tidak berubah apakah kita bergerak mendekatinya atau menjauhinya. Ia seakan-akan merupakan “kecepatan batas” yang tidak dapat diganggu oleh gerak siapa pun. Dan gagasan ini melawan seluruh intuisi yang telah dimiliki manusia sejak zaman Newton.

Kesulitan ini menjadi semakin serius karena teori elektromagnetik Maxwell—yang menggabungkan listrik dan magnet dalam satu persamaan—secara matematis menetapkan bahwa kecepatan gelombang elektromagnetik *harus* bernilai konstan dan memiliki nilai yang persis sama dengan kecepatan cahaya. Artinya, cahaya sendiri adalah gelombang elektromagnetik. Tetapi jika teori Maxwell benar, dan kecepatan cahaya adalah nilai tetap yang ditentukan oleh sifat-sifat ruang itu sendiri, maka eter tidak lagi memiliki peran apa pun. Bahkan lebih jauh lagi, kecepatan cahaya tidak bisa

bergantung pada gerak pengamat. Ia harus sama untuk semua orang, kapan pun, di mana pun.

Di sinilah terjadi gesekan paling keras antara mekanika klasik dan elektromagnetisme. Mekanika klasik mengatakan bahwa kecepatan harus bergantung pada gerak pengamat. Maxwell dan kenyataan eksperimen mengatakan bahwa cahaya tidak tunduk pada aturan itu. Dua pandangan besar ilmu pengetahuan bergerak saling bertabrakan—dua dunia yang tidak bisa hidup berdampingan.

Dan dari ketegangan inilah akhirnya lahir gagasan revolusioner Einstein: bahwa bukan cahaya yang menyesuaikan diri dengan gerak pengamat, tetapi ruang dan waktu-lah yang menyesuaikan diri, sehingga kecepatan cahaya tetap konstan bagi siapa pun yang mengukurnya.

Cahaya tidak tunduk pada hukum-hukum lama; ia memperkenalkan sesuatu yang lebih dalam, sesuatu yang akhirnya memaksa manusia menata ulang seluruh konsep ruang, waktu, dan gerak.

Kecepatan cahaya, pada dasarnya, adalah retakan pertama yang membelah dinding mekanika klasik dari dalam.

CAHAYA SEBAGAI ZAT

Setelah para ilmuwan menyadari bahwa kecepatan cahaya tidak berubah apa pun keadaan pengamatnya, mereka mencoba memahami cahaya dengan cara yang lebih sederhana—cara yang sudah lama terbukti ampuh untuk menjelaskan fenomena lain: sebagai zat. Bagaimanapun, dalam sejarah ilmu, panas pernah dianggap sebagai zat halus, listrik pernah dibayangkan sebagai fluida, bahkan magnet pernah dipaksa masuk dalam gambaran dua “cairan” yang saling dorong. Maka tidak mengherankan bahwa banyak ilmuwan mencoba mengambil langkah serupa untuk cahaya.

Jika mekanika berhasil menjelaskan gerak benda, dan teori fluida listrik berhasil (walau sementara) memberikan gambaran tentang muatan, mungkin cahaya pun bisa dianggap sebagai sesuatu yang “mengalir”—sebuah materi yang dapat bergerak dengan kecepatan sangat tinggi. Jika cahaya adalah zat, maka mungkin ia membawa energinya seperti peluru kecil, atau seperti angin halus yang mendorong benda di hadapannya. Dengan cara itu, cahaya bisa dimasukkan kembali ke dalam

dunia mekanistik yang nyaman, dunia yang hanya mengenal benda, partikel, dan gaya.

Namun pandangan ini segera menemui kesulitan besar. Pertama-tama, cahaya tidak menunjukkan tanda-tanda memiliki massa, bahkan yang sekecil apa pun. Ia tidak menurunkan benda, tidak mengisi ruang seperti gas, dan tidak menekan wadah. Ia bergerak menembus ruang hampa seakan-akan tidak membutuhkan medium apa pun. Jika cahaya adalah zat, maka zat itu memiliki perilaku yang tidak mirip dengan zat apa pun yang pernah dikenal manusia.

Kesulitan berikutnya datang dari fakta bahwa cahaya dapat saling menembus. Dua berkas cahaya yang saling berpapasan tidak saling membelokkan, tidak saling menekan, tidak saling menabrak. Mereka hanya lewat begitu saja, masing-masing seolah-olah tidak menyadari keberadaan yang lain. Namun bila cahaya adalah zat, ia harus berinteraksi seperti zat—menabrak, bertabrakan, atau setidaknya saling mengganggu.

Gelombang air saling berinteraksi. Gelombang suara saling mengganggu. Tetapi cahaya? Tidak.

Ia lewat begitu saja, tanpa meninggalkan bekas.

Ini bukan perilaku zat; ini perilaku sesuatu yang sepenuhnya lain.

Lebih dalam dari itu, cahaya memperlihatkan interferensi—fenomena ketika dua berkas cahaya dapat memperkuat atau melemahkan satu sama lain, membentuk pola terang dan gelap. Perilaku ini sama sekali tidak sesuai dengan gambaran cahaya sebagai partikel-partikel zat. Tidak ada partikel yang dapat “menghapuskan” atau “menguatkan”

partikel lainnya dengan cara yang begitu halus. Interferensi adalah ciri khas gelombang, bukan zat.

Namun yang benar-benar mematahkan kesan cahaya sebagai substansi adalah hasil-hasil teori Maxwell. Dalam persamaan elektromagnetik Maxwell, cahaya muncul bukan sebagai kumpulan benda kecil, melainkan sebagai perubahan yang merambat dalam medan listrik dan medan magnet. Cahaya adalah riak dalam medan itu, bukan entitas yang berdiri sendiri. Sama seperti riak di permukaan air bukanlah zat baru, cahaya pun bukan zat: ia adalah pola perubahan dalam struktur ruang itu sendiri.

Jika cahaya adalah gelombang dalam medan, bagaimana mungkin ia dianggap substansi? Gelombang tidak mempunyai massa. Gelombang tidak dapat dikumpulkan dalam bejana. Gelombang bukan benda. Dan yang paling menentukan: gelombang cahaya bergerak dengan kecepatan yang tidak bergantung pada siapa pun yang mengukurnya—sebuah sifat yang tidak dimiliki zat apa pun di alam ini.

Dalam pandangan mekanistik, segala sesuatu yang nyata harus memiliki substansi, harus dapat diukur massanya, harus dapat dipengaruhi oleh gerak pengamat. Tetapi cahaya menolak semuanya. Ia bukan zat. Ia bukan partikel dalam arti klasik. Ia bukan aliran materi. Ia bukan sesuatu yang bisa ditampung, dipelintir, atau diperlambat oleh gerak pengamat.

Cahaya, sebagaimana dipahami melalui Maxwell, adalah fenomena medan—sesuatu yang tidak dapat dipaksakan masuk ke dalam kerangka mekanika Newton. Dan inilah pukulan terakhir bagi pandangan lama yang menganggap segala sesuatu harus berupa massa dan gaya. Cahaya tidak

tunduk pada dinamika mekanika; ia tunduk pada hukum yang sepenuhnya baru, hukum medan.

Di titik inilah, gagasan besar mulai muncul perlahan: bahwa dunia tidak hanya berisi benda yang saling mendorong, tetapi berisi medan yang memenuhi ruang dan menentukan bagaimana benda bergerak. Dan cahaya adalah pesan dari medan itu, bukan produk dari zat apa pun.

Dengan runtuhnya anggapan cahaya sebagai substansi, pandangan mekanistik kehilangan salah satu sandaran utamanya. Dunia tidak lagi dapat dijelaskan hanya dengan partikel dan gaya. Alam ternyata jauh lebih kaya dan lebih aneh daripada yang dibayangkan Newton.

TEKA-TEKI WARNA

Setelah dunia ilmiah perlahan menerima bahwa cahaya bukanlah zat, muncul pertanyaan lain yang tampak biasa tetapi ternyata sangat dalam: apa itu warna? Warna adalah bagian tak terpisahkan dari hidup kita. Kita melihat langit biru, daun hijau, api kemerahan, pelangi yang memecah cahaya menjadi pita warna. Namun selama ribuan tahun, warna dianggap

sekadar “hiasan” pada benda, kualitas subjektif yang muncul dalam mata, tidak memiliki struktur fisika yang jelas.

Tetapi ketika cahaya mulai dipahami sebagai gelombang, warna berubah dari sekadar sifat estetis menjadi teka-teki ilmiah. Jika cahaya adalah gelombang, maka warna harus berkaitan dengan cara cahaya bergetar. Namun bagaimana gelombang yang tampaknya sama itu dapat menghasilkan warna yang sangat berbeda?

Newton adalah orang pertama yang memperlihatkan bahwa warna bukan berasal dari benda, melainkan dari cahaya itu sendiri. Dengan prisma sederhana, ia memecah cahaya putih menjadi spektrum warna. Cahaya putih ternyata bukan “jenis cahaya” tertentu, melainkan campuran seluruh cahaya berwarna. Prisma hanya menguraikan apa yang sudah ada, seperti memisahkan nada-nada dalam sebuah akord musik.

Tetapi penjelasan Newton belum masuk ke dalam dunia gelombang. Ia masih membayangkan cahaya sebagai partikel, maka baginya warna adalah sifat misterius dari partikel-partikel itu. Baru setelah teori gelombang cahaya berkembang, terutama melalui Young dan Fresnel, teka-teki warna mulai terjawab: warna adalah panjang gelombang. Setiap warna memiliki panjang gelombang tertentu dalam gelombang cahaya; biru lebih pendek, merah lebih panjang.

Di sini misteri pertama pun terurai. Tetapi muncullah misteri kedua: bila warna adalah panjang gelombang, mengapa benda-benda berbeda terlihat memiliki warna berbeda? Benda “merah” memantulkan gelombang panjang dan menyerap yang lain; benda “biru” memantulkan gelombang pendek. Dunia warna ternyata adalah permainan antara gelombang cahaya

dan sifat atom-atom dalam benda yang menentukan gelombang mana yang diteruskan, dipantulkan, atau diserap.

Namun misteri yang paling dalam justru ada pada cahaya itu sendiri. Jika warna adalah panjang gelombang, maka perbedaan warna bukanlah perbedaan zat atau materi, tetapi perbedaan frekuensi getaran. Dunia warna bukan dunia partikel yang berbeda, tetapi dunia ritme yang berbeda. Dengan demikian seluruh fenomena warna berpindah dari ranah substansi ke ranah gelombang—sebuah revolusi konsep yang menggeser cara manusia memahami dunia visual.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa pemahaman ini menghancurkan sisa-sisa pandangan lama yang ingin memperlakukan cahaya sebagai zat. Bila cahaya merah, biru, dan hijau dianggap “zat berbeda,” maka tidak mungkin menjelaskan bagaimana semuanya dapat bergabung membentuk cahaya putih. Tetapi jika semuanya adalah gelombang dengan frekuensi berbeda, maka penyatuan itu menjadi seterang siang: tampak putih ketika gelombang-gelombang itu hadir bersama, tampak berwarna ketika terpisah.

Dengan demikian, teka-teki warna menjadi bukti kuat bahwa cahaya *bukan substansi*, melainkan fenomena gelombang elektromagnetik. Warna tidak mengalir, tidak menempati ruang seperti materi, tidak bisa ditampung dalam bejana. Warna adalah karakter getaran dalam medan cahaya, dan medan itulah yang akhirnya menggantikan gagasan mekanistik lama. Warna menunjukkan bahwa sifat-sifat cahaya tidak dapat dipahami tanpa konsep medan.

Maka “teka-teki warna” bukan hanya penjelasan tentang biru atau merah; ia adalah pintu menuju pemahaman lebih dalam

bahwa dunia fisika tidak terdiri dari zat-zat kecil yang saling menabrak, melainkan dari medan dan gelombang yang mengisi ruang. Di sini, mekanika Newton mulai kehilangan cengkeramannya, dan elektromagnetisme Maxwell mulai menampakkan kekuasaannya.

“APAKAH GELOMBANG ITU?”

Setelah membahas warna dan hubungan warna dengan panjang gelombang, Einstein dan Infeld berhenti sejenak untuk bertanya sebuah hal mendasar yang sering terlewat: apa itu gelombang sebenarnya? Kata “gelombang” terasa akrab—kita melihatnya di permukaan laut, mendengarnya sebagai suara, dan mempelajarinya dalam cahaya. Namun keakraban itu sering menipu. Banyak orang merasa sudah memahami gelombang hanya karena pernah melihat riak air, padahal hakikat gelombang jauh lebih dalam dan abstrak.

Untuk memahami gelombang, bayangkan sebuah permukaan air yang tenang. Kemudian sebuah batu kecil dijatuhkan ke dalamnya. Saat batu itu menyentuh air, muncullah lingkaran-lingkaran yang merambat ke luar. Riak itu bergerak, tetapi airnya sendiri tidak ikut bergerak ke luar bersama riak. Air di satu tempat hanya naik dan turun sedikit, sementara bentuk gelombang berpindah menjauhi titik jatuhnya batu. Gelombang adalah perpindahan bentuk, bukan perpindahan materi. Ini adalah kunci penting yang sering tidak disadari orang.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa inti sebuah gelombang adalah osilasi—getaran yang terjadi di satu titik dan kemudian memengaruhi titik berikutnya, menyebarkan pola secara kontinu. Bila sebuah titik berosilasi, ia mendorong titik tetangganya untuk berosilasi, dan pola itu merambat. Tidak ada benda yang berjalan dari pusat ke pinggir; yang berpindah adalah gerakan, bukan materi. Ini berbeda sekali dari benda padat atau partikel yang berpindah di ruang.

Namun gelombang tidak hanya ada pada permukaan air. Gelombang suara misalnya terjadi dalam udara. Ketika sesuatu bergetar—seperti pita suara manusia atau membran drum—ia mendorong molekul-molekul udara terdekat. Molekul-molekul itu tidak berjalan ke telinga kita; yang berpindah hanyalah pola pemampatan dan pengurangan rapat molekul. Pola ini berjalan cepat, mencapai gendang telinga, dan kemudian diterjemahkan oleh otak kita sebagai bunyi.

Semua contoh ini menunjukkan bahwa gelombang selalu terkait dengan medium—air, udara, atau benda padat—yang dapat digetarkan. Lalu bagaimana dengan cahaya? Cahaya bergerak melalui ruang hampa. Tidak ada air, tidak ada udara, tidak ada “benda” apa pun untuk bergetar. Maka timbullah gagasan eter: medium halus tak terlihat yang konon mengisi seluruh ruang. Tetapi seperti yang sudah dibahas sebelumnya, percobaan-percobaan menunjukkan bahwa eter tidak ada. Maka muncullah pertanyaan besar: bagaimana mungkin gelombang tanpa medium?

Di sinilah Einstein & Infeld menekankan titik perubahan besar dalam sejarah fisika. Mereka menjelaskan bahwa yang bergetar dalam gelombang cahaya bukanlah materi, tetapi medan—medan listrik dan medan magnet yang saling

menghasilkan secara berulang. Cahaya bukan gelombang dalam zat, tetapi gelombang dalam struktur ruang itu sendiri. Maxwell menunjukkan bahwa perubahan dalam medan listrik dapat menghasilkan perubahan dalam medan magnet, dan perubahan medan magnet dapat menghasilkan perubahan medan listrik. Kedua medan ini saling menghidupkan satu sama lain, menciptakan gelombang yang merambat ke depan dengan kecepatan cahaya.

Dengan pandangan ini, konsep gelombang menjadi sesuatu yang sama sekali baru. Ia tidak memerlukan medium fisik; ia tidak membuat partikel bergerak dari sumber ke penerima; ia adalah pola perubahan dalam medan, dan medan itu memenuhi ruang, bahkan ruang yang tampak kosong.

Butir inilah yang membuat teori mekanistik lama runtuh. Mekanika Newton hanya mengenal benda yang saling mendorong atau menarik. Tetapi gelombang elektromagnetik menunjukkan adanya fenomena yang bergerak tanpa massa, tanpa medium, tanpa kontak langsung antar materi. Dunia tidak lagi bisa dibayangkan sebagai mesin yang tersusun dari partikel dan gaya mekanis; ia ternyata dipenuhi medan yang dapat bergetar dan menyebarkan energi tanpa membawa zat apa pun.

Einstein dan Infeld ingin pembaca merasakan bahwa memahami gelombang berarti memahami perubahan paling mendasar dalam cara berpikir fisika. Gelombang bukan hanya bentuk gerakan; ia adalah konsep yang memisahkan dunia lama Newton dari dunia baru Maxwell dan Einstein. Dengan memahami gelombang, kita siap melangkah menuju gagasan medan yang akan menggantikan teori fluida dan menggoyahkan seluruh bangunan mekanika klasik.

TEORI GELOMBANG CAHAYA

Setelah pemahaman tentang gelombang semakin kuat, dunia sains pun mulai memandang cahaya dengan cara baru. Tidak lagi dianggap sebagai zat, atau sebagai aliran partikel kecil, cahaya kini dipahami sebagai gelombang—persis seperti gelombang di air atau gelombang suara, tetapi dengan sifat jauh lebih halus dan misterius.

Teori gelombang cahaya lahir bukan dari sekali lompatan besar, tetapi dari rangkaian tanda yang semakin kuat. Interferensi, difraksi, pola terang dan gelap yang muncul ketika cahaya melewati celah sempit, semua itu menunjukkan bahwa cahaya berperilaku seperti gelombang. Bila cahaya adalah partikel, bagaimana mungkin dua “berkas” cahaya saling menghapus atau saling memperkuat? Tetapi bila ia adalah gelombang, fenomena itu justru menjadi penjelasan yang paling wajar.

Gelombang cahaya juga menjelaskan warna. Warna bukan sifat benda, bukan pula “jenis cahaya” dalam pengertian zat, tetapi perbedaan panjang gelombang dari getaran elektromagnetik. Semakin pendek panjang gelombang, semakin ke arah biru; semakin panjang, semakin ke arah merah. Dengan demikian, seluruh fenomena warna akhirnya menjadi bagian dari satu gambaran besar: cahaya adalah getaran dalam medan listrik dan magnet.

Sejak Maxwell menyatukan listrik dan magnet dalam teori medan, cahaya tidak lagi dipandang sebagai sekadar gelombang, tetapi gelombang elektromagnetik. Getaran cahaya tidak memerlukan medium; getaran itu ada dalam medan itu sendiri. Dengan satu pukulan elegan, Maxwell menyingkirkan kebutuhan akan eter, medium khayal yang selama berabad-abad dianggap sebagai “zat halus” tempat cahaya merambat.

Namun bersama dengan keberhasilan teori gelombang cahaya, muncul juga masalah besar yang tak terduga. Teori gelombang menjelaskan interferensi, pembiasan, dan warna dengan sempurna, tetapi ia gagal total menjelaskan satu hal: bagaimana cahaya membawa energi dalam jumlah tertentu ke dalam materi.

Misalnya, cahaya dapat memanaskan benda, membebaskan elektron dari logam, dan memberikan tekanan radiasi. Jika cahaya hanyalah gelombang, maka energinya harus tersebar halus di ruang. Tetapi sering kali benda hanya menyerap energi cahaya dalam paket-paket tertentu, bukan secara kontinu. Gelombang yang lembut dan terdistribusi halus tidak seharusnya memberikan dorongan energi yang terlokalisasi dan tiba-tiba.

Kesejajaran antara cahaya dan gelombang air juga mulai retak. Dua riak di air selalu saling memengaruhi, tetapi dua berkas cahaya dapat saling menembus tanpa mengubah satu sama lain. Gelombang suara berbaur di udara dan saling mengganggu, tetapi cahaya dari dua sumber lewat begitu saja dengan ketidakpedulian sempurna. Cahaya kadang berperilaku seperti gelombang murni, tetapi pada saat lain tampak seperti sesuatu yang sangat berbeda—seakan-akan ia membawa “paket-paket energi” kecil yang tidak mau tersebar.

Inilah masalah yang bahkan Maxwell tidak punya jawabannya. Teori gelombang terlalu sukses untuk ditinggalkan, tetapi terlalu lemah untuk menjelaskan semuanya. Ia menjelaskan “bagaimana cahaya menyebar di ruang,” tetapi gagal menjelaskan “bagaimana cahaya memberi energi kepada materi.”

Einstein dan Infeld menekankan bahwa inilah titik di mana pandangan lama benar-benar goyah. Jika cahaya adalah gelombang, ia tidak memiliki struktur partikel; namun jika cahaya tidak memiliki struktur partikel, bagaimana mungkin ia dapat menghantam elektron dan melepaskannya dari logam? Bagaimana mungkin ia dapat memindahkan energi dalam potongan yang diskrit?

Pada tahap ini, belum ada jawaban. Yang ada hanyalah rasa gelisah: teori gelombang cahaya yang begitu indah ternyata tidak lengkap. Ia membutuhkan sesuatu yang lain, sesuatu yang tidak ada dalam mekanika Newton, tidak ada dalam gelombang elastis, bahkan tidak ada dalam elektromagnetisme klasik.

Cahaya tampak seperti gelombang—tetapi pada saat-saat penting ia bertingkah seperti sesuatu yang jauh lebih “tegas,”

lebih “kuantum.” Dunia fisika tidak menyadari bahwa mereka berada di ambang revolusi; namun retakan itu sudah terlihat jelas.

Teori gelombang cahaya adalah kemenangan besar, tetapi juga jalan buntu besar. Ia membawa kita ke pintu yang tidak dapat dibuka oleh fisika lama, dan pintu itu kelak hanya dapat dibuka dengan gagasan radikal dari Einstein sendiri.

GELOMBANG CAHAYA LONGITUDINAL ATAU TRANSVERSAL?

Ketika para ilmuwan akhirnya menerima bahwa cahaya adalah gelombang, muncul pertanyaan besar yang mengintai di balik teori itu: jenis gelombang apakah cahaya itu? Gelombang, dalam dunia fisika klasik, hanya memiliki dua kemungkinan bentuk: longitudinal atau transversal.

Gelombang longitudinal adalah gelombang yang getarannya terjadi sejajar dengan arah rambatnya. Gelombang bunyi adalah contoh paling jelas. Ketika suara merambat melalui udara, molekul-molekul udara saling mendorong dan merapat sepanjang garis perambatan suara. Getaran dan arah rambatnya berada pada garis yang sama. Gelombang semacam ini hanya dapat berjalan dalam medium yang bisa dimampatkan dan diregangkan—seperti udara, air, atau benda padat.

Gelombang transversal berbeda. Getaran terjadi tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Gelombang pada permukaan air adalah contoh sederhana. Ketika riak air bergerak ke samping, titik air di permukaan naik dan turun, bukan maju dan mundur. Getaran dan arah rambatnya membentuk sudut sembilan puluh derajat.

Pertanyaan yang harus dijawab para ilmuwan abad ke-19 adalah: gelombang cahaya termasuk yang mana?

Sekilas, keduanya tampak masuk akal. Namun pilihan ini bukan sekadar persoalan klasifikasi; ia menyentuh dasar teori gelombang cahaya. Bila cahaya adalah gelombang longitudinal, maka ia harus merambat di medium yang bisa

dimampatkan seperti udara dalam gelombang suara. Tetapi cahaya dapat merambat di ruang hampa. Maka jika ia longitudinal, kita harus menerima keberadaan “eter”—medium yang tidak terlihat namun dapat mengalami pemampatan dan perenggangan.

Namun gelombang longitudinal menimbulkan masalah besar. Jika cahaya adalah gelombang longitudinal, maka ia seharusnya dapat merambat dengan cara tertentu dan gagal merambat dengan cara lain, sama seperti suara tidak dapat merambat melalui ruang hampa. Padahal kenyataannya, cahaya justru paling mampu merambat dalam ruang hampa.

Ilmuwan kemudian menoleh pada pilihan kedua: mungkin cahaya adalah gelombang transversal. Gelombang transversal membutuhkan medium yang memiliki kekakuan, medium yang dapat “menahan” getaran yang bergerak tegak lurus terhadap arah rambat. Namun ini justru lebih sulit dipahami. Bagaimana ruang hampa dapat memiliki kekakuan? Bagaimana kekosongan dapat menahan getaran yang bersifat transversal?

Inilah ironi besar yang dihadapi teori gelombang klasik:

- bila cahaya longitudinal, ia membutuhkan medium padat yang bisa dimampatkan;
- bila cahaya transversal, ia membutuhkan medium elastis yang bisa menahan tarikan dan geseran;
- tetapi ruang hampa tidak memiliki kedua-duanya.

Dengan kata lain, teori gelombang klasik membawa kita ke jurang kontradiksi. Cahaya jelas merupakan gelombang—interferensi dan difraksi membuktikannya—tetapi

ia tidak cocok dengan mekanisme gelombang apa pun yang dikenal dalam dunia mekanika Newton.

Namun di tengah kebingungan itu, eksperimen memberikan jawaban yang sangat tegas. Cahaya dapat dipolarisasi. Ketika cahaya melewati kristal tertentu atau dipantulkan pada sudut tertentu, cahaya keluar dalam keadaan bergetar hanya dalam satu arah tertentu. Gelombang longitudinal tidak dapat dipolarisasi, karena getarannya selalu berada dalam arah rambat. Tetapi gelombang transversal dapat.

Kesimpulan dari fenomena polarisasi ini tidak dapat disangkal: cahaya adalah gelombang transversal.

Namun kemenangan ini sekaligus menjadi pukulan telak bagi teori mekanistik lama. Gelombang transversal membutuhkan medium elastis—tetapi ruang hampa tidak mungkin elastis. Bila elastis, ruang harus memiliki struktur, kepadatan, dan sifat fisik tertentu. Namun semua percobaan untuk menemukan medium tersebut gagal. Tidak ada tanda-tanda eter. Tidak ada medium yang menahan getaran cahaya. Ruang tampak kosong, namun ia dapat “mengantarkan” gelombang transversal.

Ini adalah paradoks besar yang mengguncang fondasi fisika klasik. Cahaya bertingkah seperti gelombang transversal, tetapi tidak memiliki medium tempat ia bergetar. Dan dunia mekanika tidak memiliki bahasa atau konsep untuk menggambarkan gelombang tanpa medium. Segala sesuatu dalam mekanika Newton selalu membutuhkan benda, kepadatan, dan gaya kontak. Tapi cahaya memperlihatkan gelombang yang tidak membutuhkan zat sama sekali.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa di sinilah teori mekanistik mulai runtuh secara serius. Cahaya memaksa

munculnya konsep baru—konsep medan—yang tidak dapat direduksi menjadi partikel-partikel yang saling menekan atau mendorong. Ia menandai peralihan dari dunia Newton menuju dunia Maxwell. Dan pada akhirnya, peralihan itu membuka jalan menuju dunia Einstein, tempat ruang dan waktu sendiri harus ditafsir ulang.

ETER DAN PANDANGAN MEKANISTIK

Setelah teori gelombang cahaya diterima luas, para ilmuwan menghadapi dilema besar yang tidak bisa diabaikan. Gelombang, dalam pandangan mekanistik, harus merambat dalam suatu medium. Tanpa medium, gelombang tidak mungkin ada. Gelombang air membutuhkan air. Gelombang suara membutuhkan udara. Gelombang pada tali membutuhkan talinya. Maka, jika cahaya adalah gelombang transversal sebagaimana dibuktikan oleh polarisasi, ia membutuhkan medium elastis yang mampu menahan tegangan dan geseran—sebuah sifat yang hanya dimiliki benda fisik.

Tetapi cahaya dapat merambat melalui ruang hampa. Ruang hampa tidak memiliki massa, kepadatan, atau struktur fisik apa pun. Bagaimana mungkin kehampaan memiliki “kekakuan elastis”? Bagaimana mungkin sesuatu yang tidak ada dapat menjadi medium bagi gelombang?

Dari kontradiksi inilah lahir eter—sebuah medium imajiner yang memenuhi seluruh ruang, tak terlihat, tak tersentuh, tetapi dipercaya memiliki sifat mekanis yang hampir mustahil dibayangkan. Eter harus sangat elastis untuk memungkinkan gelombang transversal, tetapi sekaligus tidak memiliki hambatan apa pun terhadap gerak planet. Ia harus kokoh untuk menahan getaran—namun begitu ringan hingga benda apa pun dapat bergerak menembusnya tanpa hambatan. Ia harus berada di mana-mana, tetapi tidak boleh terdeteksi oleh percobaan apa pun.

Dengan kata lain, eter adalah materi yang bukan materi, sebuah teka-teki filosofis yang diciptakan hanya untuk menyelamatkan mekanika Newton dari kehancuran.

Einstein dan Infeld menggambarkan eter sebagai “penemuan yang lahir dari keputusasaan.” Ia adalah upaya agar teori gelombang cahaya tetap sesuai dengan intuisi mekanistik: bila ada gelombang, pasti ada medium. Tetapi semakin dalam para ilmuwan mencoba memahami eter, semakin absurd konsep itu menjadi. Eter harus ada, tetapi ia tidak boleh menunjukkan sifat keberadaan apa pun.

Pandangan mekanistik yang selama ini menjadi kebanggaan ilmu pengetahuan tiba-tiba terlihat rapuh. Dunia yang sebelumnya dianggap sebagai mesin besar yang bekerja dengan dorongan dan tumbukan ternyata tidak cukup untuk menjelaskan fenomena cahaya. Medan, yang sebelumnya dianggap benda sekunder dan tidak nyata, mulai menunjukkan dirinya sebagai sesuatu yang lebih mendasar daripada partikel itu sendiri.

Namun para ilmuwan waktu itu belum siap menerima bahwa medan dapat eksis tanpa medium. Mereka masih memegang

teguh mekanika Newton: segala yang ada harus berupa sesuatu. Maka eter diciptakan untuk mengisi ruang, seperti angin yang tidak pernah berhembus, seperti zat yang tidak pernah menimbulkan gesekan, tetapi tetap dianggap nyata demi mempertahankan struktur teori lama.

Selama beberapa dasawarsa, eter menjadi bagian resmi dari sains. Ia menjadi latar belakang bagi seluruh teori cahaya. Buku teks mendeskripsikan sifat-sifatnya yang aneh—elastis tetapi ringan, kuat tetapi tak terdeteksi. Banyak fisikawan merasa tidak nyaman, tetapi tidak ada alternatif lain.

Namun dengan makin berkembangnya teori elektromagnetik Maxwell, eter mulai tampak tidak hanya aneh, tetapi bertentangan dengan kenyataan. Persamaan Maxwell menggambarkan cahaya bukan sebagai getaran medium, melainkan sebagai getaran dalam medan listrik dan medan magnet. Gelombang cahaya dapat dihasilkan dari perubahan medan itu sendiri, tanpa memerlukan “zat” yang ikut bergetar. Dalam teori Maxwell, medan bukan sesuatu yang tergantung pada medium; medan itu adalah entitas fisik yang berdiri sendiri.

Dari sinilah muncul benturan keras:

- mekanika klasik menyatakan gelombang membutuhkan medium,
- Maxwell mengatakan cahaya tidak membutuhkan medium apa pun.

Eter menjadi jembatan yang tidak lagi diperlukan. Ia menggantung di antara dua dunia teori yang tidak bisa disatukan: dunia Newton dan dunia Maxwell.

Eksperimen Michelson–Morley menjadi pukulan akhir. Bila eter benar ada, bumi yang bergerak mengelilingi matahari harus menimbulkan “angin eter” yang bisa dideteksi. Namun pengukuran paling teliti menunjukkan hasil nol. Tidak ada angin eter. Tidak ada tanda-tanda keberadaan eter. Ruang tampak kosong, tetapi pembawa gelombang cahaya tetap kokoh.

Dengan demikian, eter tidak hanya tidak terdeteksi—ia menjadi tidak berguna. Untuk pertama kalinya, fisika harus menerima kenyataan bahwa gelombang dapat merambat tanpa medium, dan bahwa ruang kosong bukanlah kekosongan mekanis, tetapi arena bagi fenomena medan yang tidak memerlukan zat pendukung.

Di sinilah pandangan mekanistik tumbang. Bukan karena gagal menjelaskan satu fenomena kecil, tetapi karena seluruh landasan filosofisnya tidak lagi cocok dengan kenyataan. Alam ternyata tidak bekerja seperti mesin Newtonian. Ia bekerja melalui medan, bukan partikel yang saling dorong. Dan eter, penopang terakhir mekanika lama, runtuh di bawah beban eksperimen dan teori baru.

Inilah titik balik besar yang membuat teori relativitas menjadi mungkin. Tanpa keruntuhan eter, Einstein tidak bisa melangkah ke konsep ruang dan waktu yang baru. Dengan hilangnya eter, ruang tidak lagi menjadi wadah pasif; ia menjadi struktur dinamis yang memiliki hukum fisiknya sendiri.

BAB III

MEDAN DAN RELATIVITAS

MEDAN SEBAGAI REPRESENTASI

Setelah seluruh bangunan mekanika lama runtuh di hadapan cahaya, listrik, dan magnet, para ilmuwan akhirnya menyadari bahwa mereka sedang memasuki dunia baru—dunia medan (*field*). Konsep medan memang pernah muncul secara samar dalam teori Newton tentang gravitasi, namun waktu itu ia tidak dipahami sebagai sesuatu yang nyata. Newton sendiri merasa gelisah dengan gagasan bahwa dua benda dapat “menarik” satu sama lain dari jarak jauh tanpa perantara apa pun. Namun, karena tidak ada alternatif, ia menerima fenomena itu sebagai hukum alam yang harus diakui tanpa dijelaskan lebih jauh.

Barulah dalam teori elektromagnetik Maxwell, medan menjadi lebih dari sekadar alat matematika. Ia berubah menjadi entitas fisik, sesuatu yang tidak hanya membantu menjelaskan fenomena, tetapi menjadi bagian nyata dari struktur alam itu sendiri. Maxwell menunjukkan bahwa perubahan dalam medan listrik dapat menciptakan medan magnet, dan sebaliknya. Dengan demikian, ruang yang tampaknya kosong bukanlah kehampaan, melainkan tempat yang penuh dengan sesuatu yang dapat bergetar, membawa energi, dan menyebarkan cahaya.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa di sinilah terjadi revolusi besar dalam cara manusia merepresentasikan realitas. Di abad-abad sebelumnya, manusia membayangkan dunia sebagai koleksi benda: batu, planet, atom. Benda-benda itu memiliki posisi, massa, dan gaya yang memengaruhi satu sama lain. Tetapi kini, bukan lagi benda yang menjadi pusat, melainkan medan yang mengisi seluruh ruang. Benda bukan

lagi sumber pengaruh jarak jauh; ia hanyalah tempat medan menjadi kuat atau lemah.

Namun revolusi besar itu tidak datang sekaligus. Para ilmuwan masih harus belajar melihat medan sebagai sesuatu yang “nyata,” bukan sekadar trik matematika. Untuk itu mereka membutuhkan representasi visual—cara untuk menggambarkan sesuatu yang tidak dapat dilihat. Maka muncullah gagasan garis-garis gaya: garis imajiner yang menunjukkan arah dan kekuatan medan listrik atau magnet pada setiap titik ruang. Garis-garis itu bukan benda sungguhan, tetapi cara untuk memahami bagaimana medan “mengalir” dan bertindak.

Bayangkan sebuah magnet. Di sekelilingnya, udara tampak kosong. Tetapi bila kita menaburkan serbuk besi, serbuk itu membentuk pola lengkungan yang anggun, mengikuti garis-garis yang tak terlihat. Pola itu menunjukkan bahwa medan *ada* di sana. Ia memenuhi ruang, menggerakkan benda, dan membawa energi. Ruang kosong menjadi penuh dengan struktur yang tak kasat mata.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa konsep medan menggantikan gagasan mekanistik tentang aksi jarak jauh. Tidak ada lagi tarikan misterius antara planet dan matahari. Yang ada hanyalah medan gravitasi yang memenuhi ruang di antara keduanya. Planet tidak “merasakan” matahari secara langsung; ia hanya mengikuti bentuk medan ruang tempat ia berada. Dengan demikian, medan menjadi representasi baru dari sebab-akibat dalam alam.

Namun gagasan medan tidak hanya menyederhanakan penjelasan—ia mengubah makna realitas fisik itu sendiri. Dalam pandangan baru ini, yang nyata bukanlah benda pada

posisinya, tetapi keadaan medan di seluruh ruang. Dunia tidak lagi terdiri dari benda saling tarik, melainkan dari struktur medan yang memengaruhi gerak benda.

Satu pertanyaan besar muncul: apakah medan ini hanya alat bantu, ataukah ia benar-benar sesuatu yang eksis? Jawaban Maxwell, dan kemudian Einstein, sangat jelas: medan adalah realitas fisik yang sejati. Ia memiliki energi, dapat bergerak, dapat berubah bentuk, dapat merambat sebagai gelombang cahaya. Bila medan berubah, dunia berubah. Medan tidak membutuhkan medium. Medan ada *di dalam ruang itu sendiri*.

Konsep ini begitu kuat sehingga akhirnya membuka jalan bagi teori relativitas. Newton masih menganggap ruang sebagai panggung kosong yang tidak berubah, sesuatu yang menjadi latar tanpa ikut berperan. Tetapi bila ruang dipenuhi medan, dan bila medan memiliki dinamika, maka ruang itu sendiri tidak bisa lagi dianggap pasif. Ia adalah bagian dari drama, bukan tempat drama berlangsung.

Medan bukan lagi representasi *dari sesuatu*; medan adalah sesuatu itu sendiri.

Dalam bagian ini, Einstein dan Infeld ingin pembaca merasakan perubahan cara pandang yang radikal: dari dunia partikel menuju dunia struktur medan. Dari benda-benda yang saling tarik, menuju medan yang membentuk gerak. Dari jarak jauh yang misterius, menuju kontinuitas ruang yang hidup.

Di sinilah relativitas mulai mendapatkan fondasinya. Tanpa konsep medan, tidak mungkin memahami bahwa ruang dan waktu dapat berubah bentuk, membengkok, dan bereaksi terhadap massa dan energi. Tetapi sebelum sampai ke sana, pembaca harus terlebih dahulu menerima gagasan besar ini:

bahwa abad ke-20 bukan lagi abad mekanika, melainkan abad medan.

DUA PILAR TEORI MEDAN

Setelah konsep medan diterima bukan hanya sebagai alat bantu, tetapi sebagai bagian nyata dari struktur alam, muncul kebutuhan untuk menemukan aturan dasar yang mengatur medan itu. Dalam dunia mekanika klasik, hukum Newton menjadi fondasi yang menjelaskan gerak semua benda. Namun dalam dunia medan, tidak ada lagi “gaya jarak jauh” yang bekerja secara misterius. Yang ada hanyalah perubahan dalam medan itu sendiri.

Einstein dan Infeld mengatakan bahwa teori medan—apa pun bentuk akhirnya—harus berdiri di atas dua pilar penting. Tanpa dua pilar ini, teori medan akan runtuh atau menjadi tidak konsisten. Inilah dua syarat yang mutlak diperlukan untuk menggambarkan alam tanpa konsep gaya ala Newton.

Pilar pertama adalah bagaimana medan itu sendiri berevolusi dari titik ke titik. Artinya, setiap medan harus memiliki hukum yang menjelaskan bagaimana keadaannya berubah dalam ruang dan waktu—tanpa membutuhkan sesuatu di luar medan itu. Dalam teori Maxwell, misalnya, medan listrik dan medan magnet tidak menunggu “perintah” dari luar. Mereka berubah karena hukum internal: medan listrik yang berubah menciptakan medan magnet, dan medan magnet yang berubah

menciptakan medan listrik. Dengan demikian, ruang kosong memiliki dinamika yang mandiri.

Tetapi ada pilar kedua, yang sama pentingnya: teori medan harus menjelaskan bagaimana benda bergerak di dalam medan. Bila medan mengisi ruang, maka medan harus menentukan jalur benda, seperti angin menentukan arah layar kapal. Dalam mekanika Newton, gaya gravitasi menentukan gerak planet. Tetapi dalam teori medan, benda tidak didorong atau ditarik; ia bergerak mengikuti struktur medan di titik di mana ia berada. Seolah-olah medan “mengatur” geometri lintasan benda, memberikan arah tanpa memberikan dorongan.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa dua pilar ini—(1) hukum perkembangan medan, dan (2) hukum gerak benda dalam medan—adalah esensial. Tanpa keduanya, teori medan tidak lengkap. Bila hanya ada hukum pertama, kita tahu bagaimana medan berubah, tetapi tidak tahu bagaimana benda bergerak karenanya. Bila hanya ada hukum kedua, kita tahu bagaimana benda merespon medan, tetapi kita tidak mengetahui asal-usul atau dinamika medan itu sendiri.

Teori Maxwell adalah contoh pertama dari teori medan yang hampir sempurna. Ia memiliki persamaan yang menentukan perubahan medan elektromagnetik (pilar pertama), dan ia menjelaskan bagaimana medan itu memengaruhi gerak muatan listrik (pilar kedua). Tetapi bagian gravitasi masih tertinggal. Gravitasi Newton tidak memiliki pilar pertama—ia tidak menjelaskan bagaimana tarikan gravitasi muncul atau berkembang. Ia hanya memberikan hukum gerak, bukan hukum medan.

Kekurangan ini membuat gravitasi menjadi anomali dalam dunia fisika. Elektromagnetisme telah masuk ke era medan,

tetapi gravitasi tetap tinggal di era gaya jarak jauh, seolah-olah masih berada di masa Newton. Einstein sadar bahwa untuk menyatukan pemahaman tentang alam, gravitasi pun harus diubah menjadi teori medan. Dan agar berhasil, teori baru gravitasi harus memiliki dua pilar yang sama dengan teori elektromagnetik: hukum untuk medan gravitasi itu sendiri, dan hukum yang menjelaskan bagaimana benda bergerak di dalam medan tersebut.

Masalahnya: medan elektromagnetik memiliki sifat-sifat yang jelas—ia dapat berosilasi, membawa energi, dan mempunyai arah. Tetapi medan gravitasi tidak terlihat dalam bentuk apa pun; ia tidak menimbulkan getaran seperti cahaya. Bagaimana mungkin medan gravitasi dijelaskan tanpa membayangkan “tarikan” antar benda?

Namun justru kebingungan inilah yang membuka jalan menuju revolusi relativitas. Einstein menyadari bahwa medan gravitasi bukan gaya dan bukan “zat” yang mengisi ruang, tetapi perubahan dalam struktur ruang dan waktu itu sendiri. Dengan gagasan ini, kedua pilar yang dibutuhkan teori medan akhirnya dapat dibangun untuk gravitasi:

- pertama, hukum bagaimana ruang-waktu melengkung;
- kedua, hukum bagaimana benda bergerak dalam ruang-waktu yang melengkung itu.

Einstein dan Infeld ingin pembaca menyadari bahwa pada titik ini, dunia fisika siap memasuki era baru. Dua pilar ini menjadi kerangka umum untuk semua teori medan: dari Maxwell hingga relativitas, dan nanti hingga ke medan kuantum.

Di bawah cahaya dua pilar ini, alam terlihat bukan sebagai kumpulan benda-benda, tetapi sebagai jaringan medan yang

menentukan segala peristiwa—dan benda hanyalah manifestasi lokal dari struktur medan tersebut.

REALITAS MEDAN

Setelah dua pilar teori medan dijelaskan, pertanyaan berikutnya muncul dengan sendirinya: apakah medan itu benar-benar nyata, atau sekadar cara manusia menggambarkan dunia?

Pada zaman Newton, hanya benda yang dianggap nyata. Dunia dipandang sebagai kumpulan partikel yang bergerak. Gaya bekerja melalui jarak, dan jarak itu sunyi, hampa, tanpa isi. Ruang hanya panggung bagi benda-benda, bukan bagian dari permainan.

Namun teori Maxwell dan eksperimen-eksperimen mengenai cahaya menghancurkan gambaran lama itu. Cahaya adalah gelombang dalam medan listrik dan magnet. Gelombang cahaya membawa energi. Cahaya dapat mempengaruhi benda, menggerakkan elektron, bahkan memberikan tekanan pada permukaan. Bagaimana mungkin sesuatu yang tidak nyata dapat membawa energi yang sangat nyata?

Medan mulai menunjukkan sifat-sifat yang sebelumnya hanya diberikan pada benda: ia dapat menyimpan energi, memindahkannya, dan berubah bentuk.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa sampai titik ini, mungkin sebagian ilmuwan masih bertanya-tanya: bolehkah medan dianggap sekadar perhitungan matematis? Bolehkah kita tetap berpegang pada anggapan bahwa “yang benar-benar nyata” adalah partikel, dan medan hanyalah cara manusia memudahkan diri? Tetapi alam tidak memberikan ruang untuk keraguan itu.

Salah satu bukti paling kuat adalah energi medan elektromagnetik. Cahaya, misalnya, membawa energi dalam setiap fluktuasi gelombangnya. Energi ini tidak melekat pada partikel apa pun; ia melekat pada struktur medan. Ruang yang tampak kosong ternyata penuh dengan sesuatu yang mampu mengangkut energi dari satu tempat ke tempat lain. Ini adalah kenyataan fisik, bukan abstraksi.

Dengan kata lain: medan bukan gambaran dari sesuatu — medan adalah sesuatu itu sendiri.

Tidak ada lagi alasan untuk menganggap partikel sebagai pusat realitas dan medan sebagai pelengkapannya. Justru dalam banyak fenomena, medan lebih fundamental daripada partikel.

Partikel dapat muncul dan lenyap; medan tetap ada. Bahkan gerak partikel pun tidak dapat dijelaskan tanpa medan, karena partikel hanya “mengikuti” bentuk medan di sekitarnya, seperti daun yang mengikuti aliran air.

Einstein dan Infeld memberi contoh sederhana: sebuah muatan listrik menciptakan medan di sekitarnya. Muatan lain merasakan medan itu dan bergerak. Tetapi yang mengalami gaya bukan karena muatan langsung “menarik” dari jauh, seperti dalam pandangan Newtonian, melainkan karena medan di tempatnya berada memberinya dorongan. Muatan tidak berbicara satu sama lain melalui ruang kosong; medan menjadi perantara yang nyata.

Fenomena ini menunjukkan bahwa upaya lama untuk memahami dunia sebagai interaksi partikel-partikel saja sudah tidak memadai. Bahkan konsep “gaya” sudah tidak lagi berdiri sendiri. Gaya hanyalah manifestasi dari bentuk medan. Medanlah yang menentukan semua gerak.

Dengan semakin jelasnya realitas medan, para ilmuwan mulai menyadari bahwa ruang tidak lagi dapat dianggap sebagai panggung kosong. Jika medan memenuhi ruang, maka ruang itu sendiri memiliki struktur fisik. Dan bila ruang memiliki struktur, maka ia harus dapat berubah, melengkung, dan bereaksi terhadap kehadiran energi.

Inilah titik kritis menuju relativitas.

Einstein tidak lagi melihat gravitasi sebagai gaya, tetapi sebagai medan gravitasi yang mewakili perubahan dalam struktur ruang dan waktu. Dengan demikian:

- elektromagnetisme menggantikan gaya listrik dan magnet,
- relativitas umum menggantikan gaya gravitasi.

Dua dunia yang dulu dipandang berbeda kini bersatu dalam konsep medan. Tidak ada lagi gaya misterius yang bekerja dari jauh. Tidak ada lagi aksi tanpa perantara. Semua kejadian fisik berlangsung di dalam medan, melalui perubahan dalam medan.

Einstein dan Infeld menyimpulkan bahwa realitas fisik bergeser dari “benda” menuju medan. Bahkan partikel, dalam pandangan modern, hanyalah titik-titik di mana medan mencapai intensitas tertentu. Yang nyata bukan kumpulan benda, melainkan jaringan medan yang membentuk pola di seluruh ruang.

Medan adalah realitas baru.

Dan dari realitas medan inilah relativitas lahir — karena bila ruang dipenuhi medan, ruang sendiri bukan lagi entitas pasif; ia menjadi bagian dari hukum fisika.

MEDAN DAN ETHER

Ketika teori medan semakin menguat, satu pertanyaan lama kembali menghantui para ilmuwan: apa hubungan antara medan dan eter?

Pada masa sebelumnya, eter diciptakan sebagai medium halus yang diyakini mengisi seluruh ruang. Ia tidak terlihat, tidak dapat disentuh, tetapi dipercaya mutlak diperlukan agar gelombang cahaya dapat merambat. Gelombang, menurut mekanika klasik, tidak mungkin bergerak tanpa medium. Maka eter diciptakan sebagai “bahan” yang membuat cahaya dapat bergetar.

Namun saat konsep medan berkembang, keberadaan eter menjadi semakin dipertanyakan. Medan listrik dan magnet menunjukkan bahwa gelombang bisa ada tanpa partikel apa pun yang bergetar. Yang bergetar bukan medium fisik, tetapi nilai medan itu sendiri. Ruang yang tampak kosong ternyata mampu menampung perubahan medan yang merambat seperti gelombang cahaya.

Pada titik inilah terjadi benturan keras antara dua cara berpikir:

1. Pikiran lama: semua gelombang membutuhkan medium → maka harus ada eter.
2. Pandangan baru: medan itu nyata dan mandiri → tidak memerlukan medium mekanis.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa kebingungan seputar eter muncul karena manusia terbiasa memaknai “realitas fisik” sebagai sesuatu yang dapat disentuh atau dibayangkan seperti benda. Maka ketika muncul konsep medan—yang punya energi, dapat berubah, tetapi tidak berupa benda—kebanyakan ilmuwan mencoba memaksakan medan agar duduk di atas “sesuatu,” dan sesuatu itu diberi nama eter.

Tetapi semakin dipelajari, semakin jelas bahwa eter tidak memiliki arti fisik apa pun. Semua sifat yang dulunya disandarkan kepada eter ternyata adalah sifat medan itu sendiri. Yang mengisi ruang bukan zat misterius, tetapi medan. Yang membawa energi bukan fluida halus, tetapi gelombang medan. Yang memengaruhi benda tidak lagi gaya jarak jauh, tetapi struktur medan lokal.

Dengan kata lain: medan menggantikan eter sepenuhnya.

Namun Einstein & Infeld tidak berhenti di situ. Mereka menunjukkan bahwa persoalannya bukan hanya eter tidak diperlukan, tetapi juga konsep eter bertentangan dengan teori medan. Mengapa?

Karena eter dibayangkan sebagai medium mekanis—sesuatu yang memiliki bentuk, kepadatan, atau tegangan. Tetapi medan justru menolak semua sifat mekanis itu. Medan tidak membutuhkan penopang. Ia tidak bergantung pada benda fisik. Medan *adalah* struktur ruang itu sendiri.

Jika eter dianggap sebagai “zat,” kita jatuh ke dalam kontradiksi: cahaya yang merambat dalam ruang hampa tidak mengalami hambatan apa pun. Bila ruang penuh zat eter, benda yang bergerak pasti berinteraksi dengannya. Tetapi percobaan Michelson–Morley menunjukkan tidak ada hambatan apa pun, tidak ada arus eter, tidak ada pengaruh eter terhadap gerak benda. Dunia tampak seperti ruang kosong, tetapi gelombang cahaya tetap merambat.

Maka pilihan yang tersisa adalah menerima kenyataan yang lebih mengherankan tetapi benar: ruang kosong tidak kosong—ruang diisi oleh medan, bukan eter.

Einstein dan Infeld menegaskan bahwa langkah ini sangat radikal. Ia memaksa ilmuwan untuk meninggalkan pandangan intuitif bahwa gelombang membutuhkan medium material. Dunia mekanika lama menganggap “kekosongan sejati” mustahil. Namun fisika baru justru memperlihatkan bahwa kekosongan adalah arena kaya struktur, penuh energi, dan penuh dinamika medan.

Dengan hilangnya eter, ruang tidak lagi menjadi wadah pasif. Ia menjadi bagian dari hukum fisika. Dalam relativitas, ruang bahkan dapat melengkung, berubah bentuk, dan bereaksi terhadap massa serta energi—sesuatu yang sama sekali mustahil dalam pandangan eter klasik.

Singkatnya:

- Eter adalah upaya kuno untuk memperbaiki mekanika lama.
- Medan adalah cara baru memahami kenyataan, yang membuat eter tak lagi dibutuhkan.
- Relativitas lahir ketika ruang dipahami bukan sebagai medium mekanis, tetapi sebagai struktur geometris yang berhubungan langsung dengan medan gravitasi.

Dengan demikian, hubungan antara medan dan eter berakhir dengan satu kesimpulan tegas:

eter bukan realitas fisik — medanlah yang nyata.

Eter hanyalah bayangan dari cara berpikir lama, sedangkan medan membuka pintu menuju pemahaman baru tentang ruang, waktu, dan gravitasi.

RANGKA MEKANIS

Setelah konsep medan berdiri kokoh dan eter ditinggalkan, tampak seolah fisika telah bebas dari seluruh beban mekanika lama. Namun Einstein dan Infeld mengingatkan bahwa kenyataannya tidak sesederhana itu. Bahkan setelah teori medan diterima sebagai dasar pemahaman alam, fisika masih bertumpu pada sesuatu yang diwarisi dari zaman Newton—sesuatu yang tidak kelihatan tetapi memengaruhi cara ilmuwan berpikir. Itulah yang mereka sebut “scaffold mekanis”, perancah mekanis yang dulu menopang bangunan teori, namun kini hanya menyulitkan.

Perancah itu terdiri dari dua keyakinan lama:

1. Bahwa ruang dan waktu adalah panggung mutlak—tetap, kaku, dan tidak terpengaruh oleh kejadian fisik.
2. Bahwa medan harus hidup di atas panggung itu, bukan menjadi bagian dari panggungnya.

Dengan kata lain, meskipun fisika telah meninggalkan eter dan meninggalkan gaya jarak jauh, ia masih berpegang pada gambaran Newtonian tentang ruang dan waktu sebagai entitas pasif. Ruang dianggap seperti wadah kosong; waktu dianggap

sebagai aliran tetap yang sama bagi semua pengamat. Medan boleh dinamis, tetapi ruang dan waktu tidak boleh berubah. Inilah sisa-sisa mekanika klasik yang masih bertahan diam-diam.

Padahal, semakin dalam teori medan dikembangkan, semakin jelas bahwa medan tidak dapat dipahami tanpa melibatkan struktur ruang itu sendiri. Medan tidak hidup “di dalam” ruang; medan justru memberi ruang karakter fisiknya. Namun selama ruang dianggap sebagai panggung mekanis yang tetap, medan tidak dapat sepenuhnya dilepaskan dari gambaran eter, karena tanpa sadar fisikawan tetap membayangkan ruang sebagai sesuatu yang perlu “diisi.”

Einstein dan Infeld menggambarkan keadaan ini seperti bangunan baru yang megah, tetapi masih berdiri di atas tiang-tiang kayu tua yang sudah tidak cocok lagi dengan arsitektur yang baru. Bila teori medan memang benar-benar menggantikan mekanika lama, maka perancah Newtonian itu tidak lagi diperlukan. Tetapi karena perancah itu sudah digunakan begitu lama, ilmuwan sulit melepaskannya. Mereka tetap memakai konsep-konsep mekanis untuk menjelaskan fenomena yang seharusnya dijelaskan dengan bahasa medan.

Perancah itu tampak paling jelas dalam cara ilmuwan saat itu mencoba memikirkan gravitasi. Gravitasi masih diperlakukan seperti sesuatu yang terjadi di dalam ruang—padahal gravitasi justru merupakan perubahan dalam struktur ruang itu sendiri. Dengan mempertahankan ruang sebagai panggung mekanis yang tidak berubah, para ilmuwan mencoba membangun teori medan gravitasi, tetapi hasilnya tidak pernah memuaskan. Teorinya selalu terputus-putus, seperti mencoba memasang mesin modern ke dalam kereta kuda.

Einstein menyadari bahwa satu-satunya cara untuk membuat teori medan yang lengkap adalah melepaskan perancah mekanis itu sepenuhnya. Ruang dan waktu tidak boleh lagi dianggap tetap dan pasif. Mereka harus menjadi bagian dari dinamika fisika; mereka harus dapat berubah, melengkung, dan merespons medan serta materi.

Begitu pandangan ini diterima, semuanya berubah. Ruang tidak lagi menjadi panggung yang diam; ia menjadi bagian dari lakon. Waktu tidak lagi menjadi jam universal; ia bergantung pada gerak dan medan. Dan gravitasi, untuk pertama kalinya, dapat dipahami bukan sebagai gaya, bukan sebagai tarikan misterius, tetapi sebagai bentuk medan yang paling mendasar—medan yang menyentuh ruang dan waktu itu sendiri.

Einstein & Infeld menekankan bahwa meninggalkan perancah mekanis bukanlah sekadar pembaruan konsep, tetapi perubahan cara dalam melihat dunia. Fisika tidak lagi dimulai dari benda-benda dan gaya, melainkan dari medan yang membentuk struktur ruang-waktu. Benda-benda hanya bergerak mengikuti kurva yang diberikan medan itu.

Dengan runtuhnya perancah mekanis, fisika akhirnya siap memasuki era relativitas. Semua batasan lama—aksi jarak jauh, ruang mutlak, waktu universal, kebutuhan akan medium mekanis—hilang. Yang tersisa hanyalah medan sebagai realitas fundamental, dan ruang-waktu sebagai panggung dinamis yang dibentuk oleh medan itu sendiri.

Rangka mekanis telah runtuh.

Dan di atas reruntuhannya, relativitas—fisika modern—lahir.

ETER DAN GERAK

Setelah konsep eter kehilangan makna mekanisnya, para ilmuwan masih mencoba satu upaya terakhir untuk mempertahankannya: meskipun eter tidak dapat disentuh atau dilihat, mungkin eter masih dapat diukur melalui gerak. Bila bumi bergerak mengelilingi matahari, dan bila cahaya merambat melalui eter, maka seharusnya ada perbedaan kecil pada kecepatan cahaya tergantung arah gerak bumi terhadap eter. Dengan kata lain, gerak bumi seharusnya dapat dibandingkan dengan “angin eter,” seperti kapal yang merasakan angin laut saat bergerak.

Ide itu tampak begitu wajar sehingga para ilmuwan abad ke-19 yakin bahwa hanya masalah waktu sebelum kecepatan bumi terhadap eter ditemukan. Mereka membayangkan eter sebagai semacam “laut halus” tempat semua gelombang cahaya melaju. Bila bumi bergerak, ia harus menimbulkan arus relatif—sebuah aliran eter yang dapat diukur dengan cukup alat yang sensitif.

Tetapi ketika percobaan dilakukan dengan ketelitian luar biasa—yang paling terkenal adalah percobaan Michelson–Morley—hasilnya sungguh mengejutkan: tidak ada perbedaan kecepatan cahaya. Sama sekali tidak ada. Tidak muncul tanda sedikit pun bahwa bumi bergerak terhadap eter. Tidak ada “angin eter,” tidak ada deviasi, tidak ada perlambatan atau percepatan cahaya. Seolah-olah bumi tidak bergerak sama sekali, atau seolah-olah eter bergerak bersama bumi dengan cara yang tidak bisa dijelaskan oleh mekanika.

Beberapa ilmuwan mencoba menyelamatkan gagasan eter dengan membuat hipotesis baru: mungkin eter “terseret” oleh bumi; mungkin eter diam bersama permukaan bumi; mungkin eter hanya terseret sebagian. Tetapi setiap hipotesis baru segera bertentangan dengan eksperimen lain atau perkiraan teori. Semakin banyak yang ditambahkan, semakin jelas kelemahan konsep eter itu sendiri.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa inilah momen ketika fisika akhirnya harus jujur:

eter tidak dapat bergerak, tidak dapat diam, dan tidak dapat memberi tanda apa pun bahwa ia ada.

Ia tidak boleh bergerak karena tidak ada alat yang dapat mendeteksi gerak itu. Ia tidak boleh diam karena bumi jelas bergerak, tetapi gerak bumi tidak meninggalkan pengaruh pada

cahaya. Ia tidak boleh terseret karena itu bertentangan dengan teori Maxwell. Ia tidak boleh tidak terseret karena itu bertentangan dengan hasil eksperimen. Dengan kata lain, eter masuk ke dalam lingkaran kontradiksi yang tidak dapat keluar.

Dan di sinilah Einstein mengambil langkah radikal: lebih baik tidak ada eter sama sekali.

Jika eter tidak dapat dihubungkan dengan gerak apa pun, jika ia tidak dapat memberikan definisi kecepatan absolut, dan jika keberadaannya tidak dapat dibuktikan, maka satu-satunya kesimpulan yang konsisten adalah bahwa eter bukan bagian dari realitas fisik. Ruang tidak membutuhkan medium. Cahaya tidak membutuhkan pembawa. Medan dapat hidup tanpa substrat mekanis apa pun.

Dengan hilangnya eter, runtuhlah konsep gerak absolut. Dalam fisika Newton, ruang mutlak menjadi acuan gerak universal. Dengan eter, gerak seharusnya dapat diukur terhadap medium itu. Tetapi kini, tanpa eter, tidak ada lagi “ruang diam.” Tidak ada lagi kerangka istimewa. Tidak ada lagi kecepatan absolut.

Yang tersisa hanya gerak relatif, dan inilah pintu besar menuju relativitas Einstein.

Jika tidak ada medium yang dapat menentukan mana yang “benar-benar diam,” maka semua kerangka gerak adalah setara. Jika tidak ada arah istimewa di alam semesta, maka kecepatan cahaya harus sama bagi semua pengamat. Tidak lagi ada makna untuk berbicara tentang “kecepatan kita terhadap ruang,” karena ruang bukan materi dan tidak memiliki keadaan diam atau bergerak.

Dengan demikian, subbab ini bukan sekadar menunjukkan bahwa eter gagal sebagai konsep ilmiah. Ia menunjukkan

perubahan mendalam dalam cara kita memahami gerak itu sendiri. Gerak absolut tidak ada. Yang ada hanyalah hubungan gerak antara benda, dan hukum fisika yang berlaku untuk semua kerangka acuan tanpa diskriminasi.

Einstein & Infeld ingin pembaca melihat bahwa runtuhnya eter adalah langkah terakhir sebelum lahirnya relativitas khusus. Setelah eter hilang, medan menjadi realitas fundamental, ruang tidak lagi mutlak, dan gerak menjadi sepenuhnya relatif—semua ini membuka jalan bagi revolusi berikutnya.

WAKTU, JARAK, RELATIVITAS

Setelah eter ditinggalkan dan gerak absolut kehilangan maknanya, sains terpaksa menatap pertanyaan yang lebih

besar dan lebih sulit: apa arti waktu dan jarak dalam dunia tanpa acuan mutlak? Selama berabad-abad, sejak Newton, manusia menganggap waktu mengalir dengan kecepatan yang sama bagi semua pengamat. Satu detik adalah satu detik, di mana pun, kapan pun, bagi siapa pun. Jarak juga demikian: dua meter adalah dua meter, terlepas dari bagaimana pengamat bergerak.

Namun ketika cahaya memperlihatkan bahwa kecepatannya selalu sama bagi semua pengamat, cara pandang lama ini menjadi tidak mungkin dipertahankan. Jika dua orang bergerak relatif satu sama lain dan masing-masing mengukur kecepatan cahaya, hasilnya selalu sama. Ini menunjukkan bahwa ada sesuatu yang jauh lebih radikal sedang bekerja—sesuatu yang memaksa kita meninggalkan asumsi dasar tentang ruang dan waktu.

Einstein dan Infeld memulai penjelasan ini dengan hal sederhana: kita tidak pernah mengukur waktu secara langsung. Kita hanya mengukur perubahan, dan menetapkan satuan waktu berdasarkan perubahan yang dianggap teratur—seperti osilasi pendulum atau getaran atom. Begitu pula jarak: ia diukur dengan membandingkan dua titik dalam ruang menggunakan meteran atau sinyal cahaya.

Masalah muncul ketika dua pengamat bergerak relatif satu sama lain. Bagaimana mereka bisa sepakat tentang “pada saat yang sama”? Bagaimana mereka bisa sepakat tentang panjang sebuah benda? Dalam mekanika klasik, pertanyaan ini tidak pernah dianggap penting karena diasumsikan bahwa waktu adalah absolut. Tetapi begitu kecepatan cahaya terbukti konstan bagi semua pengamat, asumsi itu runtuh.

Einstein menunjukkan bahwa untuk mengetahui apakah dua kejadian terjadi bersamaan, kita membutuhkan sinyal—biasanya cahaya. Misalnya, dua lampu dipasang pada jarak tertentu dari seseorang. Bila cahaya dari kedua lampu tiba pada saat yang sama, ia menyimpulkan kedua lampu menyala bersamaan. Tetapi bagaimana bila pengamat itu bergerak mendekati salah satu lampu? Cahaya dari lampu yang didekatinya akan tiba lebih cepat dibanding cahaya dari lampu yang menjauh darinya. Dua kejadian yang tampak “bersamaan” bagi satu pengamat, tidak bersamaan bagi pengamat lain.

Dengan demikian, konsep “kebersamaan waktu” bukanlah fakta universal; ia bergantung pada gerak pengamat. Ini adalah pukulan pertama terhadap gagasan waktu absolut.

Berikutnya, Einstein menunjukkan bahwa pengukuran panjang juga bergantung pada keadaan gerak. Bila sebuah benda panjang bergerak relatif terhadap pengamat, metode pengukuran yang menggunakan sinyal cahaya menunjukkan bahwa panjang benda itu tampak menyusut dalam arah geraknya. Benda itu sendiri tidak berubah, namun cara pengamat mengukur jarak menjadi berbeda karena ia bergerak dalam kerangka yang lain.

Panjang tidak lagi mutlak.

Waktu tidak lagi mutlak.

Yang absolut hanyalah hukum fisika—termasuk kecepatan cahaya—sementara ruang dan waktu harus menyesuaikan diri agar hukum itu tetap benar dalam semua kerangka gerak.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa ini bukan permainan matematika. Ini adalah realitas fisik. Jam benar-benar berjalan berbeda untuk pengamat yang bergerak. Penggaris

benar-benar menunjukkan panjang berbeda bila dilihat dari kerangka gerak lain. Dunia tidak lagi bisa dipandang sebagai panggung tetap tempat benda bergerak; panggung itu sendiri berubah bentuk bergantung pada cara pengamat bergerak.

Di sinilah lahir gagasan besar relativity khusus: waktu dan jarak bukan entitas terpisah, bukan sesuatu yang berdiri sendiri. Mereka adalah bagian dari struktur tunggal: ruang-waktu, yang bentuknya bergantung pada keadaan gerak.

Dalam cerita Einstein, relativitas bukan berarti “semuanya relatif” atau “tidak ada yang pasti.” Justru sebaliknya: ia menunjukkan ada satu hal yang tetap: hukum alam, terutama kecepatan cahaya. Agar yang tetap itu benar untuk semua pengamat, maka ruang dan waktu harus berkorban—mereka harus berubah, meregang, menyusut, dan menyesuaikan diri.

Einstein dan Infeld menutup bagian ini dengan gagasan penting: relativitas tidak merusak konsep waktu dan jarak. Ia mengungkap makna yang lebih dalam: bahwa waktu dan jarak bukanlah sifat energi yang terisolasi, tetapi bagian dari hubungan antara pengamat dan peristiwa. Ruang-waktu bukan lagi kotak atau panggung; ia menjadi jaring elastis yang mempertahankan hukum universal.

Dengan pemahaman ini, fisika akhirnya siap melangkah menuju gagasan yang lebih dahsyat: bahwa bukan hanya gerak yang memengaruhi waktu dan jarak, tetapi medan gravitasi itu sendiri dapat membengkokkan ruang-waktu. Inilah jembatan menuju relativitas umum.

RELATIVITAS DAN MEKANIKA

Setelah konsep waktu dan jarak berubah secara radikal, Einstein dan Infeld kini membawa pembaca pada pertanyaan berikutnya: apa yang terjadi pada mekanika jika fondasinya—ruang dan waktu—tidak lagi mutlak?

Newton membangun seluruh mekanikanya dengan keyakinan bahwa waktu melaju sama bagi semua orang, bahwa panjang benda sama di semua kerangka, dan bahwa kecepatan dapat dijumlahkan secara sederhana. Tetapi relativitas membalikkan semuanya.

Einstein & Infeld memulai pembahasan dengan mengingatkan bahwa mekanika Newton sangat bergantung pada operasi penjumlahan kecepatan. Bila sebuah kereta bergerak 50 km/jam dan seseorang berlari di dalamnya 10 km/jam ke arah depan, maka dari luar ia terlihat bergerak 60 km/jam. Hukum ini cocok dengan pengalaman sehari-hari, dan selama ratusan tahun tidak ada alasan untuk meragukannya.

Namun ketika kecepatan cahaya dianggap konstan bagi setiap pengamat, aturan penjumlahan itu tidak bisa lagi digunakan. Jika seseorang berlari mengejar cahaya, kecepatan cahaya

tidak menjadi lebih lambat baginya. Kalau sumber cahaya bergerak mendekati kita, cahaya tetap datang dengan kecepatan yang sama. Dengan demikian, mekanika klasik dan prinsip kecepatan cahaya saling bertentangan.

Maka lahirlah kebutuhan untuk merumuskan kembali mekanika.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa perubahan ini bukanlah kosmetik—ia menyentuh inti mekanika. Konsep gaya, massa, dan momentum semuanya harus didefinisikan ulang. Dalam mekanika Newton, massa adalah besaran tetap. Tetapi relativitas menunjukkan bahwa massa berubah dengan kecepatan. Semakin cepat sebuah benda bergerak, semakin besar energinya, dan semakin besar pula “inersia” yang dimilikinya—kemampuannya untuk menolak percepatan. Benda yang mendekati kecepatan cahaya makin sulit dipercepat; ia seakan-akan menjadi semakin “berat.”

Di sinilah mekanika baru mulai mengambil bentuk. Gaya tidak lagi sekadar “mendorong massa”; gaya harus bekerja melalui struktur ruang-waktu yang berubah. Momentum tidak lagi didefinisikan sebagai *massa × kecepatan*, melainkan harus memasukkan faktor relativistik yang memastikan hukum kekekalan tetap benar meski waktu dan panjang berubah bagi setiap pengamat.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa mekanika Newton muncul sebagai kasus khusus dari mekanika relativistik—sebuah batas ketika kecepatan benda jauh lebih kecil dibanding kecepatan cahaya. Artinya, Newton tidak salah; ia hanya bekerja pada kondisi tertentu. Pada kecepatan rendah, perubahan waktu dan panjang sangat kecil sehingga

tak terdeteksi oleh pengalaman sehari-hari. Tetapi pada kecepatan tinggi, hukum Newton tidak bisa lagi bertahan.

Relativitas mengajarkan bahwa mekanika tidak berdiri sendiri. Ia tidak dapat dipahami tanpa mengikutsertakan sifat ruang dan waktu tempat gerak terjadi. Dalam mekanika Newton, ruang dan waktu adalah panggung kaku. Dalam relativitas, panggung itu hidup—mengembang, menyusut, atau berubah bergantung pada gerak pengamat. Maka hukum-hukum mekanika harus berubah sesuai panggungnya. Gerak bukan lagi soal “kecepatan dalam ruang,” melainkan lintasan dalam ruang-waktu.

Einstein dan Infeld juga menekankan bahwa mekanika relativistik menyatu secara mulus dengan teori medan elektromagnetik Maxwell. Keduanya menjadi bagian dari struktur teori yang sama, sesuatu yang tidak mungkin dilakukan oleh mekanika Newton. Harmonisasi ini menjadi petunjuk kuat bahwa fisika sedang bergerak menuju kerangka yang lebih dalam dan lebih luas.

Relativitas tidak menghancurkan mekanika; ia memperluasnya. Ia menghilangkan asumsi-asumsi lama yang tidak lagi sesuai dengan kenyataan, dan menggantikannya dengan hubungan-hubungan baru yang lebih tepat menggambarkan dunia pada kecepatan tinggi dan medan kuat. Dengan cara ini, relativitas menyatukan kembali apa yang sebelumnya terpecah: dinamika benda dan dinamika medan.

Einstein dan Infeld ingin pembaca menyadari bahwa mekanika Newton bukan ditinggalkan, tetapi ditempatkan dalam konteks yang lebih besar. Sama seperti geometri Euclid tetap benar di bidang datar, tetapi tidak di permukaan lengkung, mekanika Newton tetap benar untuk gerak lambat—tetapi ruang-waktu

alam semesta yang sebenarnya tidak datar, tidak mutlak, dan tidak seragam.

Dengan runtuhnya mekanika absolut, fisika akhirnya siap untuk lompatan berikutnya:

gravitasi bukan lagi gaya yang menarik massa-massa, tetapi medan yang membentuk geometri ruang-waktu. Mekanika, elektromagnetisme, dan konsep ruang-waktu kini bergerak menuju titik pertemuan besar: relativitas umum.

KONTINUUM RUANG–WAKTU

Setelah relativitas meruntuhkan konsep waktu dan jarak yang absolut, Einstein dan Infeld mengajak kita memahami perubahan konseptual yang lebih dalam lagi: bahwa waktu dan ruang bukan dua hal terpisah, tetapi bagian dari sebuah struktur tunggal yang saling terkait. Inilah yang mereka sebut sebagai kontinum ruang-waktu.

Dalam pandangan Newton, ruang dan waktu adalah dua entitas yang berbeda dan independen. Ruang adalah panggung luas tak terbatas, sementara waktu mengalir seperti sungai yang seragam dan tak berubah. Semua peristiwa ditempatkan di dalam ruang, dan semuanya berlangsung dalam waktu. Seseorang dapat mengukur panjang benda tanpa peduli kapan pengukuran dilakukan; seseorang dapat mengukur durasi peristiwa tanpa peduli di mana peristiwa itu terjadi.

Tetapi relativitas menunjukkan bahwa asumsi lama itu tidak dapat dipertahankan.

“Panjang” dan “durasi” tidak lagi memiliki arti universal. Dua pengamat yang bergerak relatif satu sama lain tidak setuju mengenai berapa lama sesuatu berlangsung, atau berapa panjang sebuah benda. Bahkan urutan dua kejadian yang jauh secara ruang dapat berbeda bagi dua pengamat.

Einstein & Infeld menegaskan: jika dua besaran berubah dari pengamat ke pengamat, maka tidak mungkin keduanya dipandang sebagai entitas mandiri. Mereka pasti bagian dari struktur tunggal yang berubah bersama. Dengan kata lain, ruang dan waktu harus digabungkan.

Untuk menjelaskan ini, mereka mengajak pembaca membayangkan “peristiwa.” Sebuah peristiwa bukan “benda,” tetapi sesuatu yang terjadi pada titik tertentu dalam ruang dan waktu — seperti lampu menyala atau batu menabrak tanah. Setiap peristiwa hanya dapat dijelaskan dengan menyebut *di mana* ia terjadi dan *kapan* ia terjadi. Tanpa kedua koordinat itu, peristiwa tidak memiliki makna fisik.

Di sinilah perubahan besar muncul: karena ruang dan waktu tidak terpisah dalam pengamatan,

maka setiap peristiwa harus ditempatkan dalam koordinat empat dimensi — tiga untuk ruang, dan satu untuk waktu. Ruang-waktu bukan ruang ditambah waktu, tetapi sebuah kesatuan logis tempat semua kejadian fisik berlangsung.

Einstein & Infeld menunjukkan bahwa penggabungan ini bukan sekadar cara baru mencatat data, tetapi mencerminkan realitas fisik yang sebenarnya. Hubungan antara pengamat, peristiwa, gerak, cahaya, dan medan electromagnetik semuanya hanya konsisten bila kita bekerja dengan struktur ruang-waktu empat dimensi. Waktu tidak lagi berdiri sendiri, dan ruang tidak lagi menjadi wadah pasif. Keduanya membentuk jalinan kontinu yang dapat berubah bentuk.

Mereka memberi gambaran sederhana: sebuah benda yang diam dalam satu kerangka akan “bergerak” dalam koordinat waktu. Ia memiliki jalur dalam ruang-waktu — disebut world-line. Benda yang bergerak cepat memiliki world-line yang berbeda kemiringannya. Segala gerak, bila dilihat dalam ruang-waktu, hanyalah perubahan kemiringan world-line. Tidak ada lagi perbedaan tegas antara “bergerak” dan “diam,” karena semuanya hanya lintasan berbeda di dalam struktur yang sama.

Dengan kata lain:

relativitas tidak sekadar mengoreksi mekanika; ia mengubah latar seluruh alam dari ruang dan waktu menjadi ruang-waktu.

Inilah salah satu gagasan paling radikal dalam sejarah ilmu, karena ia membalik pemahaman manusia yang diwariskan sejak zaman kuno. Tidak ada lagi “ruang kosong” dan “waktu mutlak.” Yang ada hanyalah ruang-waktu yang berinteraksi dengan materi dan medan.

Einstein & Infeld menekankan bahwa ruang-waktu bukan hanya alat visualisasi, tetapi realitas fisik yang sesungguhnya. Interaksi medan elektromagnetik, hubungan antara kecepatan cahaya dan gerak, bahkan konsep energi semuanya menjadi sederhana begitu kita menerima ruang-waktu sebagai dasar. Sebaliknya, jika kita mencoba mempertahankan ruang dan waktu terpisah, kita akan terus dipaksa menambah aturan, hipotesis, dan koreksi yang makin rumit.

Kontinuum ruang-waktu menjadi bahasa alam yang baru — lebih sederhana secara logika, lebih kaya secara fisik, dan lebih sesuai dengan hasil eksperimen.

Di ujung subbab ini, Einstein dan Infeld mempersiapkan pembaca untuk langkah berikutnya:

Jika ruang-waktu adalah struktur yang hidup dan menyatu, mungkinkah struktur itu bukan hanya wadah peristiwa, melainkan bagian dari dinamika fisik itu sendiri?

Pertanyaan ini membuka jalan menuju relativitas umum, di mana ruang-waktu tidak hanya menjadi arena, tetapi melengkung, berubah, dan bereaksi terhadap massa dan energi.

RELATIVITAS UMUM

Setelah mengungkapkan bahwa ruang dan waktu bukan entitas terpisah, Einstein & Infeld melangkah lebih jauh: apa yang menentukan bentuk ruang-waktu?

Dalam relativitas khusus, ruang-waktu dianggap datar—sebuah panggung empat dimensi tempat peristiwa-peristiwa terjadi dan tempat benda-benda bergerak mengikuti garis lurus (atau jalur geodesik). Namun ini belum cukup untuk menjelaskan gravitasi. Newton menganggap gravitasi sebagai gaya yang bekerja dari jarak jauh. Tetapi gagasan itu tidak sejalan dengan prinsip medan dan tidak cocok dengan pandangan baru tentang ruang-waktu.

Einstein melihat bahwa untuk menciptakan teori gravitasi yang sesuai dengan prinsip relativitas, ia harus merombak seluruh fondasi gagasan lama. Gravitasi tidak bisa lagi dianggap sebagai gaya. Jika gaya gravitasi bekerja dengan cara Newtonian, ia akan memperkenalkan kerangka acuan istimewa—sesuatu yang dilarang oleh relativitas. Maka gravitasi harus dicari di tempat lain, bukan sebagai gaya, tetapi sebagai sifat ruang-waktu itu sendiri.

Gagasan ini terlihat radikal, tetapi memiliki titik awal sederhana: di ruang angkasa yang bebas gravitasi, benda yang dilepaskan tanpa gaya akan bergerak lurus. Tetapi ketika gravitasi hadir, benda tampak menyimpang, seolah ditarik oleh suatu gaya.

Einstein bertanya: apakah mungkin “gaya tarik” itu hanyalah ilusi? Apakah sebenarnya benda bergerak lurus, tetapi di dalam ruang-waktu yang tidak lurus?

Dalam bahasa lain: gravitasi bukanlah gaya — gravitasi adalah kelengkungan ruang-waktu.

Einstein dan Infeld menjelaskan logika ini perlahan. Jika ruang-waktu dapat melengkung, maka jalur paling lurus (geodesik) dalam ruang-waktu tidak akan terlihat lurus bagi kita. Benda yang kita kira “jatuh” sebenarnya hanya mengikuti jalur lurus dalam ruang-waktu yang melengkung oleh keberadaan massa. Matahari, misalnya, tidak “menarik” planet. Kehadiran Matahari mengubah bentuk ruang-waktu di sekitarnya, dan planet bergerak mengikuti kelengkungan itu.

Inilah inti teori relativitas umum.

Einstein mengambil inspirasi penting dari prinsip equivalensi: perbedaan antara percepatan dan gravitasi hanyalah persoalan kerangka acuan. Jika kita berada dalam lift yang jatuh bebas, gravitasi seakan menghilang. Jika kita berada dalam lift yang didorong ke atas dengan percepatan tertentu, kita merasakannya seperti gravitasi. Hal ini menunjukkan bahwa gravitasi bukan gaya nyata, melainkan efek dari gerak relatif kerangka acuan. Maka satu-satunya cara untuk memahami gravitasi secara menyeluruh adalah dengan mengubah geometri ruang-waktu itu sendiri.

Einstein & Infeld menegaskan bahwa teori baru ini membutuhkan dua jenis hukum:

1. Hukum yang menentukan bentuk ruang-waktu — yaitu bagaimana massa dan energi melengkungkan geometri.

2. Hukum yang menentukan gerak benda dalam ruang-waktu itu — yaitu bagaimana benda mengikuti jalur geodesik dalam kelengkungan tersebut.

Dengan kata lain, relativitas umum adalah teori medan gravitasi yang konsisten dengan struktur ruang-waktu. Medan gravitasi bukan lagi gaya yang dipancarkan, melainkan perubahan bentuk ruang-waktu yang memengaruhi gerak seluruh benda.

Einstein dan Infeld menggambarkan bahwa gagasan ini menghilangkan keharusan adanya “aksi jarak jauh.” Tidak ada lagi tarikan misterius antara planet dan Matahari. Semua interaksi gravitasi terjadi karena ruang-waktu di antara keduanya memiliki bentuk tertentu. Bentuk inilah yang memaksa planet mengikuti orbit elips, sama seperti bola yang menggelinding mengikuti lekukan permukaan.

Dengan cara ini, relativitas umum mempersatukan konsep medan dan ruang-waktu:

- medan gravitasi adalah struktur ruang-waktu itu sendiri
- dan perubahan dalam medan adalah perubahan dalam geometri ruang-waktu.

Einstein & Infeld menutup subbab ini dengan penekanan bahwa relativitas umum bukan hanya perluasan dari relativitas khusus, tetapi perubahan pemahaman tentang realitas itu sendiri. Ruang dan waktu bukan latar pasif; mereka adalah aktor dalam drama kosmos. Kehadiran massa dan energi menentukan bentuk ruang-waktu, dan bentuk ruang-waktu menentukan gerak materi.

Di sinilah fisika mencapai titik balik besar: dunia tidak lagi digerakkan oleh gaya, tetapi oleh geometri.

DI LUAR DAN DI DALAM LIFT

Untuk memahami gravitasi dari sudut pandang baru, Einstein dan Infeld membawa kita ke sebuah gambaran sederhana, tetapi sangat dalam: sebuah lift tertutup, yang dapat berada dalam dua keadaan — jatuh bebas atau dipercepat. Dari sini, mereka menunjukkan bagaimana gravitasi dan percepatan dapat saling meniru dengan sempurna, sehingga apa yang kita sebut “gaya gravitasi” sebenarnya hanyalah efek gerak dalam ruang-waktu.

Bayangkan seseorang berada di dalam lift yang tertutup rapat, sehingga ia tidak dapat melihat dunia di luar. Jika lift itu diam di permukaan bumi, ia merasakan berat tubuhnya. Kakinya menekan lantai, lantai menahan tubuhnya. Ia yakin ada “gaya gravitasi” yang menariknya ke bawah.

Namun kini bayangkan lift itu dilepaskan dan jatuh bebas. Dalam keadaan ini, orang tersebut tidak lagi merasakan berat. Lantai tidak menekan kakinya. Bila ia melepaskan sebuah kunci dari tangannya, kunci itu mengambang bersamanya. Dalam lift yang jatuh bebas, gravitasi seakan-akan menghilang. Tubuhnya melayang seperti astronot dalam keadaan tanpa bobot.

Einstein melihat ini sebagai petunjuk penting: di dalam lift yang jatuh bebas, tidak ada eksperimen internal yang dapat memberitahu apakah gravitasi sedang bekerja atau tidak.

Gravitasi dapat “diubah” oleh keadaan gerak kerangka acuan.

Sekarang bayangkan skenario yang berlawanan. Lift itu berada jauh dari planet mana pun, melayang di ruang angkasa—tempat gravitasi tidak dapat dirasakan. Bila lift didorong dengan percepatan konstan ke atas, orang di dalamnya tiba-tiba merasakan lantai menekan kakinya. Ia merasa berat. Bila ia menjatuhkan kunci, kunci itu jatuh ke “lantai,” persis seperti di bumi.

Tetapi di sini tidak ada gravitasi sama sekali. Yang ada hanyalah percepatan lift. Meskipun demikian, pengalaman fisik orang itu sama persis seperti ketika ia berdiri di permukaan bumi. Ia tidak bisa membedakan apakah “gaya” yang dirasakannya berasal dari massa bumi atau dari percepatan lift.

Einstein & Infeld menyimpulkan bahwa:

- gravitasi dapat dihilangkan dengan memilih kerangka acuan yang jatuh bebas
- gravitasi dapat ditiru oleh percepatan yang tepat

Inilah inti prinsip equivalensi:
efek gravitasi lokal identik dengan efek percepatan.

Dengan prinsip ini, gravitasi berhenti menjadi gaya misterius yang bekerja dari jauh. Ia menjadi efek geometris dari ruang-waktu yang membuat benda-benda mengikuti lintasan tertentu. Seseorang di dalam lift yang jatuh bebas sedang mengikuti geodesik ruang-waktu — jalur “lurus” dalam geometri yang melengkung itu. Yang ia rasakan sebagai hilangnya berat hanyalah karena ia mengikuti alur alami ruang-waktu tanpa hambatan.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa *pengamat di dalam lift tidak dapat membedakan apakah ia berada dalam medan gravitasi atau dalam lift yang dipercepat*. Yang berubah bukan pengalaman fisiknya, tetapi interpretasi geometri ruang-waktu.

Sekarang bayangkan dua benda di dalam lift yang jatuh bebas, dijatuhkan dari dua titik berbeda. Keduanya akan bergerak mendekat seiring jatuhnya lift, bukan karena ada gaya yang menarik mereka satu sama lain, tetapi karena lintasan geodesik dalam ruang-waktu melengkung membuat jalur mereka bertemu. Ini menjelaskan mengapa benda jatuh menuju pusat bumi: bukan karena ditarik, tetapi karena ruang-waktu di sekitar bumi melengkung.

Di sinilah Einstein mengubah gravitasi dari gaya menjadi geometri.

Lift menjadi gambaran sederhana, tetapi menyimpan seluruh filosofi relativitas umum. Apa yang kita anggap “berat,” “jatuh,” “ditarik,” semuanya dapat dijelaskan melalui posisi dan gerak dalam ruang-waktu yang melengkung. Jika kita berada di

kerangka acuan yang salah, kita mengira ada gaya. Jika kita berada dalam kerangka yang tepat, gaya itu menghilang.

Einstein & Infeld ingin pembaca melihat bahwa gravitasi hanyalah perspektif dari dalam kerangka acuan tertentu. Bila kita memilih kerangka acuan yang sesuai—kerangka jatuh bebas—gravitasi menghilang sepenuhnya. Dengan cara ini, Einstein menyatukan gerak, percepatan, dan gravitasi ke dalam satu gambar besar: geometri ruang-waktu yang menentukan semua gerak.

GEOMETRI DAN EKSPERIMEN

Setelah menjelaskan lift yang jatuh bebas dan bagaimana gravitasi identik dengan percepatan, Einstein dan Infeld membawa pembaca ke konsekuensi yang lebih besar: bahwa geometri ruang tidak lagi sesuatu yang pasti, sesuatu yang “benar selamanya,” seperti yang diajarkan Euclid berabad-abad.

Sebaliknya, geometri harus diuji melalui eksperimen, karena geometri ruang *ditentukan oleh gravitasi*.

Dalam matematika, kita mengenal banyak geometri: Euclid, Lobachevsky, Riemann, dan lainnya. Secara teoretis, semuanya konsisten, semuanya sah. Matematika tidak mengatakan mana yang benar untuk dunia. Ia hanya menyediakan kemungkinan. Tetapi fisika harus memilih salah satu—karena dunia kita memiliki bentuk tertentu.

Namun bagaimana mengetahui bentuk ruang yang sesungguhnya?

Einstein & Infeld menegaskan bahwa jawaban ini tidak bisa dicari dalam matematika saja.

Ia harus dicari dalam eksperimen.

Geometri Euclid dan pengalaman sehari-hari

Dalam ruang biasa, kita percaya bahwa jumlah sudut segitiga sama dengan 180 derajat. Kita percaya bahwa garis lurus adalah jarak terpendek antara dua titik. Semua ini tampak benar karena pada skala kecil—di bumi, dalam keseharian—ruang tampak datar. Jika kita menggambar segitiga kecil di kertas, sudut-sudutnya memang berjumlah 180 derajat.

Tetapi apa yang terjadi jika segitiga itu digambar di permukaan bumi?

Jika kita membuat segitiga besar dengan tiga titik: misalnya di Kutub Utara dan dua titik di garis khatulistiwa, kita mendapatkan jumlah sudut lebih dari 180 derajat. Permukaan bumi tidak datar; ia lengkung. Geometri Euclid gagal di sana.

Dari contoh ini Einstein & Infeld menunjukkan: geometri adalah bagian dari fisika, bukan logika murni. Geometri menggambarkan sifat ruang yang *nyata*, bukan ruang ideal abstrak.

Ruang dipengaruhi oleh gravitasi

Jika permukaan bumi yang lengkung dapat menghasilkan geometri non-Euclid, bagaimana dengan ruang di sekitar massa besar?

Apakah gravitasi dapat mengubah bentuk ruang itu sendiri?

Einstein menjawab: ya.

Gravitasi bukan gaya yang bekerja dalam ruang, tetapi kelengkungan ruang-waktu itu sendiri. Maka ruang di sekitar Matahari tidak Euclidean. Cahaya yang lewat dekat Matahari tidak berjalan lurus (dalam arti Euclid), melainkan mengikuti jalur lengkung yang ditentukan oleh geometri ruang yang melengkung. Hal ini dapat diuji: pada gerhana matahari, posisi bintang tampak bergeser karena cahaya mereka dibelokkan oleh gravitasi Matahari. Ini bukan efek optik; ini adalah bukti bahwa geometri ruang di dekat Matahari tidak datar.

Dengan demikian, geometri menjadi sesuatu yang harus diukur melalui percobaan fisik, bukan ditentukan oleh otoritas matematika atau tradisi intelektual.

Penggaris, jam, dan alat ukur bukan “netral”

Einstein & Infeld menekankan bahwa dalam fisika Newton, penggaris dan arloji dianggap benda ideal yang tidak dipengaruhi apa pun. Panjang penggaris selalu sama; detik pada jam selalu sama. Tetapi relativitas menunjukkan bahwa:

- panjang penggaris dapat berubah tergantung gerak
- laju jam dapat berubah tergantung gravitasi
- jalur cahaya tidak lurus jika ruang melengkung

Dengan kata lain, alat ukur itu sendiri tunduk pada hukum fisika.

Ketika gravitasi berubah, alat ukur berubah, geometri berubah.

Geometri bukanlah panggung tetap; ia adalah bagian dari drama alam itu sendiri.

Eksperimen menentukan geometri ruang-waktu

Einstein & Infeld ingin pembaca memahami bahwa ini bukan sekadar permainan konsep. Jika geometri memang menggambarkan ruang-waktu nyata, maka eksperimenlah yang memutuskan: apakah ruang datar atau melengkung, bagaimana cahaya bergerak, bagaimana benda bergerak dalam medan gravitasi, bagaimana jam berdetak di tempat tinggi dan rendah

Semua ini dapat diuji. Dan ternyata hasilnya konsisten dengan geometri lengkung ruang-waktu yang diprediksi oleh relativitas umum.

Dengan demikian, relativitas umum bukan hanya teori tentang gravitasi: ia adalah teori tentang geometri alam.

Ruang bukan wadah kosong yang pasif.

Ruang—bersama waktu—adalah entitas fisik yang bentuknya dapat berubah oleh massa dan energi.

Dan geometri adalah cara kita menggambarkan bentuk itu.

RELATIVITAS UMUM DAN PEMBUKTIANNYA

Setelah membangun teori yang revolusioner—bahwa gravitasi bukan gaya, melainkan kelengkungan ruang-waktu—Einstein menghadapi satu pertanyaan yang menentukan:

Bagaimana membuktikannya?

Sebuah teori, betapapun indahinya, tidak berarti apa-apa jika tidak dapat diuji oleh alam.

Einstein & Infeld menunjukkan bahwa relativitas umum tidak hanya lebih elegan dari teori Newton; ia juga lebih benar, karena memprediksi gejala yang tidak dapat dijelaskan oleh gravitasi klasik. Untuk pertama kali dalam sejarah, geometri ruang—sesuatu yang tampaknya abstrak—menjadi sesuatu yang dapat diuji secara nyata.

Berikut tiga “batu ujian” besar yang mereka jelaskan.

1. Pergeseran Perihelion Merkurius

Salah satu misteri lama dalam astronomi adalah gerak orbit Merkurius. Planet itu mengelilingi Matahari dalam orbit elips, tetapi posisi titik terdekatnya dari Matahari (perihelion) perlahan-lahan bergeser dari tahun ke tahun. Sebagian besar pergeseran ini dapat dijelaskan oleh gangguan gravitasi planet lain—kecuali 36 detik busur per abad yang tidak dapat dijelaskan oleh teori Newton, seolah-olah ada gaya tambahan yang sangat kecil namun nyata.

Relativitas umum memprediksi pergeseran tambahan itu secara tepat, tanpa parameter tambahan atau tebakan arbitrer. Gravitasi Newton gagal di titik ini; relativitas Einstein memecahkannya dengan sempurna.

Einstein menyebut momen itu sebagai salah satu pengalaman paling emosional dalam hidup ilmiahnya: ketika persamaan matematikanya yang rumit mengeluarkan angka yang tepat sesuai pengamatan astronomi.

2. Pembelokan Cahaya oleh Gravitasi

Jika ruang di sekitar massa besar melengkung, maka cahaya yang melewati daerah itu harus mengikuti jalur lengkung pula. Dengan kata lain, cahaya harus dibelokkan oleh gravitasi.

Einstein menghitung besar pembelokan cahaya saat melintas dekat Matahari.

Tetapi bagaimana mengamatinya? Cahaya bintang biasanya kalah terang oleh sinar Matahari. Satu-satunya kesempatan

adalah saat gerhana matahari total, ketika Matahari tertutup piringan Bulan.

Pada tahun 1919, dua ekspedisi astronomi—yang dipimpin Eddington—mengukur posisi bintang saat gerhana dan membandingkannya dengan posisi normal bintang tersebut. Hasilnya sesuai dengan prediksi Einstein.

Cahaya bintang benar-benar dibelokkan oleh gravitasi Matahari.

Bukan karena gaya menarik cahaya—karena cahaya tidak memiliki massa—melainkan karena ruang itu sendiri melengkung.

Ini adalah salah satu kemenangan terbesar dalam sejarah sains.

3. Perubahan Frekuensi Cahaya (Gravitational Redshift)

Cahaya yang bergerak melawan medan gravitasi harus kehilangan energi. Karena energi cahaya berhubungan dengan frekuensinya, cahaya akan bergeser ke arah merah ketika keluar dari medan gravitasi yang kuat.

Newton tidak dapat memprediksi fenomena seperti ini. Relativitas umum memprediksinya dengan tegas.

Walau Einstein sudah yakin dengan hasilnya, pembuktian eksperimental memerlukan teknologi yang jauh lebih halus dan baru dilakukan beberapa dekade kemudian. Namun secara prinsip, efek ini menjadi salah satu verifikasi kuat teori relativitas umum: gravitasi memengaruhi laju waktu dan frekuensi cahaya.

Kesimpulan: Gravitasi sebagai Geometri Teruji oleh Alam

Einstein & Infeld menekankan bahwa keberhasilan relativitas umum bukan sekadar keberhasilan prediksi. Lebih dari itu, ia menandakan bahwa geometri ruang-waktu adalah bagian dari fisikawan nyata. Kelengkungan ruang, jalur cahaya, orbit planet, dan jalur benda jatuh semua tunduk pada hukum geometri dinamis ini.

Teori ini tidak memerlukan “gaya” gravitasi. Ia tidak memerlukan medium atau eter. Ia hanya memerlukan satu prinsip mendasar:

massa dan energi memberi bentuk pada ruang-waktu, dan ruang-waktu memberi aturan gerak bagi massa dan energi.

Relativitas umum diverifikasi bukan oleh satu eksperimen, tetapi oleh keseluruhan struktur fenomena alam yang selama ini terpecah-pecah dan misterius. Segalanya kini berada dalam satu kerangka yang serasi.

Einstein & Infeld menutup bagian ini dengan pesan halus: bahwa sains tidak berhenti pada pembuktian, tetapi selalu membongkar asas lama untuk membangun pandangan baru yang lebih mendalam. Relativitas umum tidak hanya menyelesaikan masalah gravitasi; ia mengubah cara manusia memandang alam semesta.

MEDAN DAN MATERI

Setelah membangun teori medan gravitasi yang berdiri kokoh di atas geometri ruang-waktu, Einstein & Infeld mengajak pembaca menatap pertanyaan yang lebih mendasar: apakah “materi” dan “medan” benar-benar dua hal yang berbeda? Dalam pandangan klasik, keduanya dipisahkan tajam. Materi adalah “benda,” sesuatu yang memiliki massa, menempati ruang, dan menjadi sumber gaya. Medan adalah “pengaruh,” sesuatu yang berada di sekitar benda dan tidak memiliki wujud sendiri.

Namun sepanjang perjalanan Bab III, perbedaan itu telah semakin memudar.

Medan elektromagnetik memiliki energi, dapat merambat sebagai gelombang cahaya, dan dapat memengaruhi benda lain. Medan gravitasi bukan lagi gaya, tetapi struktur ruang-waktu itu sendiri. Materi tidak hanya bergerak *di dalam* medan, tetapi justru *dibentuk* oleh medan dan *membentuk* medan kembali. Dalam situasi ini, sulit mempertahankan batas mekanis lama antara materi dan medan.

Einstein & Infeld menjelaskan ketegangan ini dengan jujur: teori medan modern sangat elegan dalam menggambarkan gaya listrik, magnet, dan gravitasi, tetapi masih tersisa satu jenis “gaya” yang belum dimasukkan sepenuhnya ke dalam bahasa medan—yaitu struktur internal materi itu sendiri. Dalam persamaan relativitas umum, materi muncul dalam bentuk “tensor energi-momentum,” semacam paket informasi yang menunjukkan bagaimana energi, tekanan, dan massa terdistribusi.

Tetapi apa itu “materi” pada akhirnya?

Apakah ia sesuatu yang berdaulat, atau justru sebuah bentuk khusus dari medan?

Einstein dan Infeld menyadari bahwa dalam relativitas umum, medan gravitasi menjadi begitu mendasar sehingga materi hanya tampil sebagai sumber kelengkungan ruang-waktu, bukan sebagai benda keras yang berdiri sendiri. Bahkan massa, yang dulu dianggap sifat paling mendasar dari materi, kini dipahami sebagai bentuk energi—dan energi dapat mengalir dalam medan, berubah bentuk, dan tidak harus melekat pada “partikel.”

Lebih jauh lagi, mereka melihat bahwa struktur teoritis antara medan dan materi masih tidak simetris.

- Medan elektromagnetik digambarkan dengan persamaan medan.
- Medan gravitasi adalah geometri itu sendiri.
- Tetapi “materi” masih dimasukkan sebagai sesuatu yang berasal dari luar persamaan, bukan sebagai bagian dari medan.

Dengan kata lain, materi masih menjadi elemen asing yang belum sepenuhnya diserap oleh bahasa medan.

Einstein & Infeld mengakui bahwa ini adalah titik lemahnya fisika saat itu. Untuk membuat teori yang benar-benar lengkap, alam tidak boleh memiliki dua jenis “bahan dasar.” Tidak boleh ada medan di satu sisi dan materi di sisi lain. Alam harus menggunakan satu elemen fundamental saja, satu struktur yang melandasi semuanya.

Apakah mungkin semua materi adalah medan?

Apakah “partikel” hanyalah simpul atau konsentrasi dari medan itu sendiri?

Inilah arah yang Einstein cita-citakan: teori medan yang dapat memunculkan materi sebagai manifestasi medan, bukan sebagai tambahan buatan. Tetapi ia mengakui bahwa fisika pada masa itu (1938) belum mampu mencapainya.

Namun satu hal jelas: relativitas umum telah menggeser posisi materi dari “otoritas tertinggi” menjadi bagian dari interaksi medan. Materi tidak lagi bisa dipandang terpisah dari ruang-waktu. Ia tidak hanya tinggal di dalam ruang-waktu; ia memberi bentuk pada ruang-waktu. Dan ruang-waktu tidak hanya menjadi latar; ia menentukan gerak materi.

Di sini, fisika memasuki wilayah baru di mana batas antara “apa yang ada” (materi) dan “bagaimana ia berpengaruh” (medan) semakin kabur. Para ilmuwan mulai melihat bahwa mungkin keduanya hanya dua sisi dari satu realitas yang sama.

BAB IV KUANTA

KONTINUITAS DAN DISKONTINUITAS

Setelah fisika klasik dipaksa merombak fondasinya karena relativitas, datanglah kejutan baru: dunia ternyata tidak hanya berbeda dari apa yang dibayangkan Newton, tetapi juga berbeda dari apa yang dibayangkan Maxwell. Revolusi medan menjelaskan cahaya sebagai gelombang yang halus dan kontinu. Semua perubahan medan, menurut Maxwell, terjadi tanpa loncatan; nilai medan berubah secara bertahap dari titik ke titik, seolah-olah alam adalah kain halus tanpa robekan.

Selama hampir setengah abad, pandangan ini tidak pernah ditentang.

Gelombang cahaya tampak begitu mulus; interferensi dan difraksi menunjukkan sifatnya yang kontinu. Tidak ada alasan

untuk membayangkan cahaya sebagai sesuatu selain gelombang yang dapat dibagi menjadi bagian sekecil apa pun.

Namun, ketika para ilmuwan mulai mempelajari interaksi cahaya dengan materi—terutama dalam fenomena radiasi panas—muncullah sesuatu yang tidak terduga. Teori gelombang Maxwell gagal menjelaskan pola radiasi yang dihasilkan oleh benda panas. Tidak peduli bagaimana persamaan itu disesuaikan, hasilnya tidak sesuai dengan pengamatan.

Max Planck, dalam upaya menyelamatkan teori fisika dari kontradiksi berat, membuat langkah yang tampak kecil tetapi ternyata mengguncang seluruh struktur ilmu: ia mengusulkan bahwa energi cahaya tidak ditransfer secara kontinu, tetapi dalam paket-paket kecil yang ia sebut *kuanta*. Energi tidak dapat dibagi sembarang kecil; ia datang dalam unit tertentu, seolah-olah alam memiliki “butiran.”

Dengan kata lain, Planck memperkenalkan ketidakterusan (discontinuity) ke dalam dunia yang sebelumnya dianggap sepenuhnya kontinu.

Einstein dan Infeld menjelaskan bahwa langkah Planck bukan sekadar trik matematis, tetapi isyarat bahwa asumsi lama—bahwa semua proses fisika berlangsung secara halus—tidak lagi benar. Cahaya mungkin tampak seperti gelombang, tetapi dalam interaksinya dengan materi, ia bertingkah seperti paket energi terpisah. Discontinuity menjadi kenyataan fisik yang tidak dapat diabaikan.

Krisis itu semakin dalam ketika Einstein mempelajari efek fotolistrik: cahaya dapat “menendang” elektron keluar dari logam, tetapi hanya jika frekuensinya cukup tinggi. Cahaya

dengan frekuensi rendah tidak pernah berhasil, seberapa pun besar intensitasnya. Hal ini hanya bisa dijelaskan jika cahaya membawa kuantum energi, bukan energi kontinu. Semakin tinggi frekuensi, semakin besar energinya.

Dengan ini, Einstein membuat kesimpulan berani: cahaya tidak hanya ditransfer dalam paket, tetapi mungkin *berada* dalam paket itu sendiri.

Gelombang cahaya yang mulus ternyata memiliki sisi lain: sifat partikel, yang kemudian disebut *foton*. Cahaya kini tampak memiliki dua wajah:

- kadang ia gelombang yang kontinu,
- kadang ia paket energi diskrit.

Einstein & Infeld menggambarkan keadaan fisika pada momen ini dengan jujur: teori medan yang begitu sukses tiba-tiba terasa tidak lengkap. Jika alam pada level mendasar bersifat diskrit, bagaimana mungkin medan yang bersifat kontinu dapat menggambarkan dunia secara tepat? Bagaimana dua gambaran ini—kontinuitas Maxwell dan diskontinuitas Planck—dapat bersatu dalam satu kerangka?

Secara filosofis, ketegangan ini sangat besar.

Alam yang sebelumnya dianggap sebagai jalinan mulus dan teratur, kini tampak memiliki struktur berbutir—seolah-olah ada batas terkecil untuk energi, untuk tindakan, bahkan mungkin untuk ruang dan waktu itu sendiri.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa ambiguitas ini bukanlah kesalahan teori, tetapi cermin dari alam itu sendiri. Alam memperlihatkan dua wajah yang berbeda tergantung bagaimana kita menelitinya. Gelombang dan partikel bukan

dua hal yang bertentangan, tetapi dua aspek dari realitas yang lebih dalam—realitas yang belum sepenuhnya dipahami.

Fenomena kuantum membuka bab baru fisika, sama radikalnya dengan revolusi relativitas. Ia menunjukkan bahwa alam tidak bisa dijelaskan sepenuhnya dengan konsep kontinuitas. Bahwa di samping kelengkungan ruang-waktu dan gelombang medan, ada struktur diskrit yang tersembunyi di jantung energi.

Subbab ini menandai batas di mana fisika klasik—meski telah direformasi oleh relativitas—harus kembali membuka pintu menuju dunia baru: dunia kuantum, di mana kehalusan dan ketidakterusan hidup berdampingan, dan di mana intuisi manusia mulai goyah di hadapan kenyataan yang lebih rumit daripada dugaan siapa pun.

KUANTA ELEMENTER MATERI DAN LISTRIK

Setelah cahaya terbukti bersifat kuantum—ditransfer dalam paket-paket energi—Einstein dan Infeld mengajak kita melihat bahwa gejala serupa terjadi juga pada hal-hal yang selama ini dianggap paling kontinu dan paling “benda”: materi dan listrik.

Pada abad ke-19, para ilmuwan mulai menyadari bahwa bahan kimia menampilkan pola tidak terduga. Zat tertentu hanya bereaksi dalam perbandingan yang tetap; massa unsur

mengikuti aturan sederhana yang tidak bisa dijelaskan jika materi dianggap kontinu. Dari sinilah muncul gagasan bahwa materi tersusun dari atom, unit-unit kecil yang tidak dapat dibagi.

Atom pada awalnya hanyalah hipotesis untuk menjelaskan pola kimia. Tetapi semakin banyak eksperimen dilakukan, semakin kuat bukti bahwa materi benar-benar granular, memiliki struktur diskrit yang tidak dapat diratakan menjadi “zat kontinu,” sebagaimana dibayangkan oleh filsafat alam sebelumnya.

Namun Einstein & Infeld menekankan bahwa atom bukan satu-satunya “butir” dalam alam. Ketika listrik mulai dipelajari secara lebih teliti, muncul kenyataan baru: muatan listrik juga muncul dalam unit-unit diskrit. Muatan tidak pernah muncul dalam jumlah sembarang. Ia selalu merupakan kelipatan dari suatu besaran dasar—muatan elektron.

Inilah salah satu fakta kuantum paling dalam tentang listrik: semua muatan di alam adalah kelipatan dari satu satuan kecil, muatan elementer. Tidak pernah ditemukan muatan yang bukan kelipatan itu.

Dengan kata lain, listrik juga bersifat berbutir.

Einstein & Infeld memandang ini sebagai revolusi besar kedua setelah kuantisasi cahaya. Dua hal yang dianggap paling berbeda—gelombang elektromagnetik dan materi padat—ternyata memiliki karakter yang sama: keduanya tersusun dari unit-unit dasar yang tidak dapat dipecah menjadi jumlah sebarang kecil.

- Cahaya: paket energi (foton).
- Listrik: paket muatan (elektron).

- Materi: paket massa/struktur (atom dan kemudian inti + elektron).

Keteraturan ini menunjukkan bahwa diskontinuitas adalah ciri umum alam, bukan penyimpangan eksperimental.

Sebelum teori kuantum, ilmuwan percaya bahwa segala sesuatu dapat dibagi tanpa batas. Jika kita memotong sesuatu menjadi dua, lalu memotong lagi, dan lagi, itu hanyalah persoalan kemampuan teknologi. Dunia dianggap kontinu, halus, dan tersusun dari zat yang dapat dibagi sehalus apa pun.

Tetapi alam berbicara lain.

Alam menolak dibagi sembarang halus. Ia memiliki “unit-unit dasar” yang tidak bisa diturunkan lagi. Dunia pada skala kecil bukan kain tenunan rapat, tetapi mozaik berbutir halus.

Einstein dan Infeld menekankan bahwa fakta ini meruntuhkan seluruh bangunan pemikiran klasik. Fisika harus menghadapi kenyataan bahwa tidak hanya medan yang menolak gambaran mekanistik lama, tetapi materi itu sendiri. Kita tidak dapat lagi menggunakan konsep energi atau muatan sebagai sesuatu yang halus dan kontinu. Bahkan gerak elektron dalam atom pun hanya dapat terjadi dalam tingkat-tingkat energi tertentu—bukan sembarang nilai.

Dengan demikian, seluruh struktur materi bergantung pada prinsip ketidakterusan, sama seperti cahaya.

Satu akibat filosofis besar muncul:

Jika materi dan listrik bersifat kuantum, dan jika cahaya juga kuantum, maka batas-batas klasik antara “benda” dan “energi,” “partikel” dan “gelombang,” mulai kabur. Unit-unit dasar alam

tidak cocok sepenuhnya dengan konsep yang familiar bagi indra manusia.

Einstein & Infeld mengajak pembaca memahami bahwa ilmu pengetahuan menghadapi krisis baru:
bagaimana menyatukan teori medan yang kontinu dengan kenyataan bahwa materi dan listrik bersifat diskrit?

KUANTA CAHAYA

Setelah membahas bahwa energi dan muatan muncul dalam unit-unit diskrit, Einstein & Infeld mengarahkan pembaca kembali kepada cahaya—sumber dari kontradiksi terbesar dalam fisika saat itu. Cahaya telah dijelaskan dengan indah oleh teori Maxwell sebagai gelombang dalam medan elektromagnetik. Semua fenomena seperti interferensi, difraksi, dan polarisasi tampak mendukung sifat gelombang yang halus dan kontinu.

Namun, ketika cahaya berinteraksi dengan materi, sifat itu seolah menghilang. Cahaya tidak lagi menampilkan wajahnya sebagai gelombang, tetapi sebagai butiran energi yang menumbuk elektron satu demi satu. Fenomena seperti efek fotolistrik tidak dapat dipahami jika cahaya adalah gelombang kontinu. Cahaya bertingkah seolah ia membawa “pukulan” kecil yang terpisah-pisah — paket energi yang kini kita sebut foton.

Einstein & Infeld menjelaskan bahwa gagasan ini pertama kali muncul ketika Planck menemukan bahwa energi radiasi benda hitam hanya dapat dipancarkan dalam kelipatan tertentu. Tetapi Planck masih menganggap ini sekadar trik matematika.

Einstein melangkah lebih jauh: ia menyatakan bahwa cahaya itu sendiri terdiri dari paket energi, bukan hanya proses pemancarannya.

Ini adalah langkah berani, karena bertentangan langsung dengan teori gelombang yang sudah kokoh.

Einstein menggambarkan foton sebagai “*kuantum energi yang terkonsentrasi*” — sesuatu yang bisa ditransfer secara utuh, tidak bisa dibagi, dan menabrak elektron seperti peluru kecil. Ketika sebuah elektron menerima foton, ia tersentak dengan energi tertentu yang tidak berasal dari distribusi gelombang, tetapi dari satu paket tunggal.

Fenomena efek fotolistrik mendukung sepenuhnya gagasan ini:

- Cahaya berfrekuensi rendah tidak pernah mengeluarkan elektron, meski intensitasnya sangat besar.
- Cahaya berfrekuensi tinggi selalu dapat mengeluarkan elektron, bahkan bila intensitasnya sangat kecil.

Sifat ini hanya mungkin jika energi cahaya tidak tersebar merata seperti gelombang, tetapi datang dalam potongan-potongan, dan besar energi setiap potongan bergantung pada frekuensi cahaya.

Cahaya memiliki dua wajah:

- Dalam ruang kosong, ia merambat sebagai gelombang yang halus.
- Dalam interaksi dengan materi, ia bertindak sebagai partikel energi diskrit.

Einstein & Infeld menyebut ini sebagai “*dualisme*”, tetapi mereka juga menekankan bahwa istilah ini tidak sepenuhnya memuaskan. Bukan berarti cahaya adalah kadang gelombang, kadang partikel, seolah-olah ia berubah-ubah. Yang terjadi adalah bahwa konsep-konsep lama tidak cukup untuk menggambarkan sesuatu yang lebih dalam: cahaya adalah entitas yang tidak sesuai sepenuhnya dengan kategori klasik kita.

Fisikawan tidak memiliki kata yang tepat, sehingga mereka menyebut satu sisi cahaya sebagai “gelombang” dan sisi lainnya sebagai “partikel,” padahal keduanya hanya representasi untuk dua aspek dari realitas yang sama.

Einstein & Infeld menyatakan dengan tegas bahwa teori Maxwell tidak salah—ia hanya tidak lengkap. Teori gelombang masih benar untuk menjelaskan propagasi cahaya. Tetapi untuk menjelaskan bagaimana cahaya memberikan energi, bagaimana ia dipancarkan atau diserap, dan bagaimana ia berinteraksi dengan atom, kita membutuhkan gambaran foton.

Dengan kata lain:

gelombang menjelaskan perjalanan cahaya; foton menjelaskan tindakannya.

Subbab ini menunjukkan bahwa fisika berada di persimpangan yang membingungkan. Dua teori yang sama-sama benar tampak tidak dapat digabungkan. Gelombang dan partikel adalah dua bahasa untuk sesuatu yang sama, tetapi tidak ada satu bahasa pun yang dapat menggambarkannya sepenuhnya. Di sinilah awal dari krisis intelektual yang akan melahirkan mekanika kuantum modern.

Einstein dan Infeld menutup bagian ini dengan pengingat penting:

revolusi kuantum tidak muncul untuk menggantikan teori lama, tetapi untuk melengkapinya. Gelombang masih ada, partikel masih ada, tetapi keduanya hanyalah bayangan dari realitas kuantum yang lebih dalam, yang belum sepenuhnya dapat dipahami pada masa itu.

SPEKTRUM CAHAYA

Setelah memahami bahwa cahaya dapat muncul dalam paket energi, Einstein & Infeld membawa kita ke salah satu bukti paling meyakinkan dari dunia nyata: spektrum cahaya yang dipancarkan dan diserap oleh atom.

Di sinilah sifat kuantum energi menjadi sangat jelas — bukan sekadar teori, tetapi kenyataan yang dapat dilihat dengan mata melalui prisma.

Garis-garis warna yang tidak dapat dijelaskan oleh teori klasik

Ketika cahaya dari lampu gas atau bintang dilewatkan melalui prisma, cahaya itu tidak menghasilkan pelangi halus yang kontinu. Sebaliknya, ia terpecah menjadi garis-garis warna yang sangat tajam, seolah-olah atom hanya memancarkan warna-warna tertentu dan menolak warna lainnya.

Ini adalah fakta eksperimental yang telah diketahui sejak abad ke-19, tetapi tidak seorang pun mampu menjelaskannya dengan teori medan klasik. Jika atom bergetar seperti osilator mekanis, seharusnya ia memancarkan spektrum kontinu — *semua* warna dalam rentang tertentu. Namun kenyataannya tidak demikian. Setiap unsur kimia memiliki sidik jari spektral yang unik: pola garis yang sama sekali tidak menyerupai gelombang kontinu Maxwell.

Einstein & Infeld menekankan betapa misteriusnya hal ini bagi fisikawan klasik.

Mengapa alam memilih warna-warna tertentu saja?

Bohr dan gagasan tingkat energi diskrit

Terobosan datang dari Niels Bohr. Ia mengusulkan bahwa elektron dalam atom tidak dapat berada pada sembarang orbit, tetapi hanya pada orbit-orbit dengan energi tertentu. Energi atom tidak kontinu — ia datang dalam “tingkatan.”

Ketika elektron turun dari satu tingkat energi ke tingkat lain, ia memancarkan foton dengan frekuensi tertentu. Frekuensi ini bergantung pada selisih energi kedua tingkat itu. Karena energi tingkat atom bersifat diskrit, maka cahaya yang dipancarkan juga muncul dalam frekuensi diskrit — menghasilkan garis-garis spektrum.

Dengan kata lain:

- perpindahan energi → foton dengan frekuensi tertentu

- tidak ada perpindahan energi lain → tidak ada warna lain

Inilah alasan mengapa spektrum atom bukan pelangi, tetapi serangkaian garis.

Einstein & Infeld menekankan bahwa gagasan Bohr bukan hanya penjelasan cerdas, tetapi bukti langsung bahwa energi atom bersifat kuantum. Teori ini harmonis dengan gagasan cahaya sebagai kuantum energi.

Spektrum sebagai bukti dialog antara cahaya dan struktur atom

Ketika cahaya melewati gas, beberapa frekuensi hilang dari spektrum — menciptakan garis-garis gelap. Gas tersebut “menyerap” hanya frekuensi tertentu, yaitu frekuensi yang cocok dengan selisih tingkat energi atom gas tersebut.

Ini memperlihatkan dua hal sekaligus:

1. Cahaya memiliki paket energi tertentu (foton).
2. Atom memiliki tingkat energi tertentu yang hanya bisa berubah dengan menyerap atau memancarkan paket energi itu.

Dengan demikian, spektrum menjadi jembatan antara teori cahaya dan teori materi.

Di sinilah dua dunia — cahaya dan atom — saling menyapa.

Einstein & Infeld menjelaskan bahwa pola spektrum bukan hanya fenomena fisik biasa, melainkan *peta struktur atom*.

Dengan mengamati garis-garis spektrum, kita dapat mengetahui bagaimana energi disusun dalam atom. Alam memberi kita cara untuk “melihat” ke dalam atom tanpa benar-benar melihatnya secara langsung.

Kenapa teori klasik gagal total

Dalam teori klasik:

- energi getaran dapat berubah dengan nilai sekecil apa pun
- cahaya dipancarkan dalam spektrum kontinu
- elektron dapat berputar pada semua orbit

Tetapi spektrum menunjukkan bahwa:

- elektron *tidak bebas memilih* orbit apa pun
- energi hanya berubah dalam loncatan tertentu
- cahaya dipancarkan sebagai foton dengan energi tertentu

Kesenjangan antara teori klasik dan percobaan sangat besar sehingga fisika harus dibangun ulang dari dasar.

Einstein & Infeld menulis bahwa spektrum adalah bukti kuat bahwa alam menghindari kontinuitas pada tingkat fundamental. Dunia atom bukan panggung halus, tetapi arena tempat energi melompat, berubah secara tiba-tiba — sebuah dunia yang benar-benar berbeda dari dunia mekanis yang dapat kita bayangkan secara intuitif.

Spektrum cahaya: bahasa rahasia atom

Pada akhir bab ini, Einstein & Infeld mengajak pembaca melihat spektrum sebagai “bahasa” atom. Setiap unsur memancarkan garis spektral tertentu—dan dari garis inilah lahir astronomi modern, fisika atom, dan mekanika kuantum.

Jika cahaya adalah gelombang, spektrum seharusnya halus. Jika cahaya adalah partikel murni, interferensi tidak akan pernah terjadi.

Tetapi alam menunjukkan dua wajah sekaligus — dan spektrum adalah bukti paling jelas bahwa dunia kuantum tidak tunduk pada kategori pikiran manusia yang sederhana.

GELOMBANG MATERI

Setelah memahami bahwa cahaya memiliki dua wajah—gelombang dan partikel—Einstein & Infeld membawa pembaca ke gagasan yang lebih mengejutkan lagi: materi juga memiliki dua wajah.

Selama ribuan tahun, manusia menganggap materi sebagai sesuatu yang pasti dan partikular. Batu adalah batu; elektron adalah partikel kecil; proton, atom, semuanya dibayangkan sebagai benda mini yang memiliki posisi dan lintasan jelas.

Namun penemuan kuantum cahaya menantang batas ini. Jika cahaya yang tampak seperti gelombang dapat bersifat partikular, mungkinkah materi yang tampak seperti partikel juga memiliki sifat gelombang?

Pertanyaan itu dijawab secara brilian oleh Louis de Broglie.

De Broglie: setiap partikel memiliki gelombang

De Broglie mengusulkan sesuatu yang bagi banyak fisikawan saat itu terdengar gila:

setiap partikel materi memiliki gelombang yang menyertainya, dan panjang gelombang itu bergantung pada momentum partikel. Artinya:

- elektron memiliki gelombang
- proton memiliki gelombang
- bahkan atom dan molekul pun, jika bergerak cukup cepat atau cukup ringan, memiliki gelombang

Gagasan ini radikal karena membalik seluruh cara pikir lama. Bukan hanya cahaya yang “menyamar” sebagai partikel; materi pun ternyata tidak sepenuhnya partikular.

Einstein & Infeld menjelaskan bahwa langkah ini bukan spekulasi. De Broglie menunjukkan bahwa gelombang materi adalah konsekuensi logis dari hubungan energi-frekuensi (Planck) dan energi-momentum (relativitas). Jika cahaya yang

memiliki momentum mengikuti rumus gelombang, mengapa elektron tidak?

Gelombang materi terbukti secara eksperimen

Tidak lama setelah gagasan De Broglie muncul, dua ilmuwan Amerika—Davisson dan Germer—melakukan percobaan yang mengonfirmasi keberadaan gelombang elektron. Ketika elektron ditembakkan ke kisi kristal, elektron tidak berperilaku seperti bola kecil yang memantul. Mereka menghasilkan pola interferensi, sama seperti gelombang cahaya.

Ini adalah bukti tak terbantahkan:
elektron memiliki sifat gelombang.

Setiap partikel materi, sekecil apa pun, membawa gelombang yang menentukan bagaimana ia bergerak dan berinteraksi.

Einstein & Infeld menekankan bahwa temuan ini mengubah fisika secara mendasar. Jika elektron memiliki gelombang, maka orbit elektron dalam atom bukan jalur mekanis seperti planet mengorbit Matahari, melainkan pola gelombang yang stabil dalam ruang. Spektrum cahaya yang kita lihat sebelumnya adalah gema langsung dari struktur gelombang ini.

Apa arti gelombang materi?

Dalam dunia biasa, sifat partikel dan gelombang adalah dua hal yang saling bertentangan.

- Partikel memiliki lokasi tertentu dan bergerak sepanjang lintasan tertentu.
- Gelombang menyebar, saling tumpang tindih, dan tidak memiliki posisi tunggal.

Bagaimana mungkin sesuatu bisa menjadi keduanya?

Einstein & Infeld menjelaskan bahwa gelombang materi bukan gelombang “zat” yang bergetar di ruang seperti gelombang air. Bukan pula benda yang menyebar seperti awan kecil.

Gelombang materi adalah gelombang kemungkinan, struktur matematis yang menunjukkan bagaimana partikel dapat berperilaku. Pola gelombang itulah yang menentukan peluang partikel muncul di tempat tertentu.

Dengan kata lain:

- partikel adalah “pukulan lokal”
- gelombang adalah pola yang memberi arah pada pukulan itu

Materi tidak benar-benar menyebar, tetapi kemungkinan posisinya mengikuti bentuk gelombang.

Ini adalah awal gagasan fungsi gelombang, yang kemudian menjadi pusat mekanika kuantum.

Dunia berubah menjadi struktur gelombang

Einstein & Infeld menggambarkan bahwa dengan gelombang materi, fisika memasuki dunia baru yang jauh lebih sulit dibayangkan daripada relativitas. Dalam relativitas, dunia berubah tetapi masih dapat divisualisasikan: ruang melengkung, waktu melambat, tetapi semuanya tetap kontinu.

Dalam kuantum, tidak ada visualisasi sederhana.

Elektron tidak lagi memiliki lintasan.

Benda kecil tidak bergerak “di sini lalu di sana,” melainkan mengikuti pola gelombang yang memandu peluang keberadaannya.

Di alam kuantum:

- kontinuitas digantikan oleh loncatan
- posisi digantikan oleh distribusi
- jalur digantikan oleh probabilitas

Materi tidak lagi padat dan tunggal; ia adalah “bayangan” dari gelombang yang tidak dapat dilihat langsung.

Einstein & Infeld menegaskan bahwa gelombang materi bukan tambahan kecil pada fisika, tetapi fondasi baru. Tanpa gelombang materi, kita tidak bisa memahami atom, kimia, logam, kristal, atau cahaya itu sendiri.

GELOMBANG PROBABILITAS

Setelah para ilmuwan menerima gagasan bahwa elektron dan partikel lain memiliki gelombang, muncul pertanyaan besar: gelombang macam apa ini?

Pada awalnya, banyak fisikawan berharap gelombang materi adalah gelombang nyata seperti gelombang air atau suara — sesuatu yang bergetar dalam ruang. Tetapi segera menjadi jelas bahwa tidak ada medium fisik yang dapat digoyangkan oleh gelombang ini. Tidak ada “eter” mekanis yang bisa mendukungnya. Ruang itu sendiri tidak berosilasi.

Maka muncul krisis: jika bukan gelombang fisik, apa arti gelombang materi?

Di sinilah muncul gagasan yang paling revolusioner dari Schrödinger dan kemudian Born:

gelombang materi adalah gelombang kemungkinan — gelombang yang tidak menggambarkan apa yang terjadi secara pasti, tetapi *apa yang mungkin terjadi*.

Ini adalah perubahan paradigma terbesar dalam seluruh sejarah sains.

Gelombang yang tidak menggambarkan benda, tetapi peluang

Dalam fisika klasik, setiap benda kecil selalu memiliki:

- posisi tertentu,

- kecepatan tertentu,
- lintasan tertentu.

Tidak ada keraguan. Alam dianggap tegas dan deterministik. Tetapi gelombang materi mengubah segalanya. Gelombang ini tidak memberi tahu kita di mana partikel *berada*, tetapi memberi tahu di mana ia bisa berada, dengan tingkat kemungkinan tertentu.

Einstein & Infeld menjelaskan begini:

fungsi gelombang bukanlah gelombang fisik, tetapi perhitungan matematika yang menjelaskan peluang munculnya partikel pada titik tertentu. Densitas gelombang tidak menggambarkan materi yang tersebar; ia menggambarkan *ketidakpastian* yang melekat pada dunia mikroskopik.

Puncak gelombang berarti probabilitas tinggi.

Lembah gelombang berarti probabilitas rendah.

Tetapi partikel itu sendiri tetap bersifat lokal — ketika ia dideteksi, ia selalu muncul sebagai satu entitas kecil, bukan sebagai gelombang.

Mengapa gelombang probabilitas diperlukan?

Einstein & Infeld memberi contoh:

ketika elektron ditembakkan satu demi satu melalui dua celah, pola interferensi yang muncul pada layar tetap pola gelombang, meskipun elektron tiba satu per satu seperti butiran. Hal ini tidak bisa dijelaskan dengan model partikel murni. Gelombang probabilitas — bukan gelombang fisik — justru menggambarkan *peluang* elektron muncul setelah melalui celah.

Dengan kata lain:

- elektron datang sebagai partikel,
- tetapi peluang ke mana ia pergi ditentukan oleh gelombang.

Dunia kuantum bukan dunia di mana objek fisik berubah bentuk menjadi gelombang, tetapi dunia di mana *peluang* berperilaku seperti gelombang.

Ketidakpastian bukan kelemahan, tetapi sifat alam

Gelombang probabilitas membawa gagasan yang sulit diterima: alam pada dasarnya tidak deterministik.

Kita tidak dapat mengetahui lintasan pasti sebuah elektron. Yang dapat kita ketahui hanyalah *probabilitas* lintasan itu.

Einstein sendiri gelisah terhadap hal ini — ia tidak sepenuhnya setuju bahwa probabilitas adalah unsur fundamental dalam alam (“Tuhan tidak bermain dadu”). Namun Einstein & Infeld tetap menjelaskan fakta ilmiahnya dengan jelas: semua percobaan menunjukkan bahwa perilaku kuantum tidak bisa diprediksi secara pasti.

Gelombang probabilitas bukan kekurangan pengetahuan kita. Ia adalah aturan dunia mikroskopik itu sendiri.

Hukum yang sangat tepat — tetapi hanya tentang peluang

Einstein & Infeld menekankan bahwa sekalipun mekanika kuantum hanya memprediksi probabilitas, teori ini sangat akurat. Ia dapat:

- memprediksi bentuk spektrum atom,

- menjelaskan stabilitas materi,
- memprediksi reaktivitas kimia,
- menjelaskan konduktivitas logam dan semikonduktor,
- meramalkan interferensi dan difraksi partikel.

Semua ini hanya mungkin jika gelombang probabilitas dianggap nyata dalam arti matematis — meskipun bukan “nyata” dalam arti fisik seperti gelombang air.

Alam pada tingkat terdalam adalah pola probabilitas

Einstein & Infeld menutup bagian ini dengan penekanan kuat: gelombang probabilitas menunjukkan bahwa dunia tidak bekerja seperti mesin kecil yang mengikuti jalur pasti. Dunia bekerja sebagai keseluruhan pola probabilitas, di mana setiap peristiwa memiliki kemungkinan tertentu dan gelombang itu adalah bahasa yang dipakai alam untuk menentukan kemungkinan tersebut.

Dengan ini, konsep gelombang dan partikel tidak lagi dilihat sebagai dua entitas yang berbeda, tetapi dua cara menggambarkan satu kenyataan yang lebih dalam: realitas kuantum, yang tidak menyerupai dunia indra manusia.

FISIKA DAN REALITAS

Setelah mengikuti perjalanan panjang dari teori cahaya, struktur atom, gelombang materi, hingga gelombang probabilitas, Einstein dan Infeld akhirnya berhenti sejenak untuk menanyakan pertanyaan yang jarang disentuh tetapi justru paling mendasar:

Apa sebenarnya hubungan antara fisika dan kenyataan?

Pertanyaan ini muncul bukan karena fisika gagal, tetapi karena fisika berhasil *terlalu jauh*—hingga membawa kita meninggalkan konsep sehari-hari yang dulu dianggap sebagai fondasi realitas.

Dalam fisika klasik, dunia tampak tegas dan sederhana. Benda bergerak mengikuti lintasan tertentu, dipengaruhi gaya tertentu, dan ruang serta waktu berdiri sebagai panggung yang stabil.

Ilmuwan dapat menunjuk pada sesuatu dan berkata, “Inilah realitas fisik.”

Tetapi setelah relativitas menghancurkan gagasan waktu mutlak, setelah medan menggantikan konsep gaya, dan setelah mekanika kuantum menunjukkan bahwa partikel bahkan tidak memiliki lintasan pasti, pertanyaan itu kembali mendesak:

Seberapa jauh fisika menggambarkan apa yang “ada,” dan seberapa jauh ia hanya menggambarkan apa yang “kita pikir ada”?

Fisika tidak pernah berkata: ‘Beginilah kenyataan.’

Einstein dan Infeld menegaskan bahwa hukum-hukum fisika bukanlah foto objektif alam.

Hukum itu adalah pembentukan intelektual, diciptakan oleh manusia untuk menghubungkan pengalaman-pengalaman yang terpisah. Kita tidak memungut hukum dari alam seperti menemukan batu di jalan. Kita *menyusun* hukum itu, lalu mengujinya pada pengalaman dunia luar.

Mereka mengingatkan bahwa bahasa fisika selalu merupakan abstraksi.

Kita tidak pernah melihat “medan listrik” secara langsung. Kita tidak pernah melihat “gelombang probabilitas.” Bahkan lintasan partikel pun bukan sesuatu yang terlihat; itu hanyalah konstruksi untuk merangkum pola gerak.

Fisika adalah upaya memberi bentuk pada dunia melalui konsep—konsep yang mungkin bekerja dengan baik dalam satu zaman, tetapi harus ditinggalkan pada zaman berikutnya.

Setiap teori besar adalah langkah dalam perkembangan konsep, bukan akhir dari perjalanan

Einstein & Infeld menunjukkan pola historis yang jelas:

- Newton memberi kita konsep gaya dan lintasan.
- Maxwell memberi kita konsep medan.
- Relativitas mengubah ruang dan waktu menjadi struktur dinamis.
- Kuantum menghilangkan kepastian dan menggantikannya dengan probabilitas.

Setiap kali fisika bertemu batas baru, ia tidak menambal bagian yang rusak; ia *menggantinya* dengan struktur yang benar-benar baru.

Inilah sebabnya mereka menolak pandangan bahwa teori fisika pada akhirnya mencapai “fondasi terakhir.” Tidak ada fondasi terakhir. Setiap fondasi adalah pijakan sementara untuk melompat lebih jauh.

Mekanika kuantum dan krisis realitas

Einstein dan Infeld sangat jujur ketika menulis bagian ini. Mereka mengakui bahwa mekanika kuantum—walaupun sangat berhasil sebagai teori—telah mengguncang pengertian kita tentang realitas.

Dalam kuantum:

- partikel tidak memiliki posisi pasti sebelum diukur,

- gelombang tidak menggambarkan zat fisik,
- hukum hanya memprediksi probabilitas, bukan kepastian.

Tiba-tiba, dunia tidak lagi mirip dengan dunia keseharian. Bahkan konsep “ada di sini” dan “bergerak ke sana” tidak lagi mutlak. Apa yang tampak sebagai realitas menjadi sangat bergantung pada pengamatan.

Einstein gelisah menghadapi hal ini, bukan karena ia meragukan hasil eksperimen, tetapi karena ia merasa fisika belum mencapai bentuk yang sepenuhnya memuaskan. Baginya, realitas fisik seharusnya tidak bergantung pada tindakan pengamat.

Namun Einstein & Infeld tidak menolak mekanika kuantum. Mereka mengakui keberhasilannya luar biasa. Mereka hanya menyatakan bahwa teori ini menuntut kita meninjau kembali apa yang kita maksud dengan “kenyataan.”

Fisika sebagai jembatan antara dunia dan pikiran

Di bagian akhir, mereka menyampaikan inti renungan mereka: fisika bukan pencatat realitas murni, tetapi jembatan antara pengalaman inderawi dan struktur intelektual yang kita bangun.

Pengalaman memberi kita data.

Pikiran memberi kita bentuk.

Fisikalah yang menghubungkan keduanya.

Karena itu:

- teori dapat berubah,
- konsep dapat diganti,
- gambaran dunia dapat direvisi,

tetapi hubungan antara pengalaman dan penjelasanlah yang tetap menjadi tujuan fisika.

Mereka mengajak pembaca menerima bahwa fisika modern bukanlah kehilangan realitas, tetapi menemukan realitas yang lebih luas dari yang pernah dibayangkan. Realitas yang tidak tunduk pada intuisi manusia, tetapi tetap dapat dipahami melalui struktur matematis yang konsisten.