

Pendahuluan

Teori medan kuantum, atau quantum field theory dan sering disingkat QFT, adalah bahasa utama fisika modern untuk menjelaskan partikel elementer dan interaksinya. Ia muncul karena dua gagasan besar abad ke-20 harus hidup bersama: mekanika kuantum, yang mengajarkan bahwa keadaan fisik dijelaskan oleh amplitudo probabilitas, dan relativitas khusus, yang mengajarkan bahwa ruang dan waktu membentuk satu kesatuan ruang-waktu serta bahwa hukum fisika harus sama bagi pengamat inersial yang bergerak relatif satu sama lain. Dalam fisika partikel modern, penggabungan dua gagasan ini secara sistematis dilakukan melalui teori medan kuantum; inilah kerangka yang digunakan untuk merumuskan elektrodinamika kuantum, teori elektrolemah, dan kromodinamika kuantum sebagai bagian dari Model Standar (Peskin & Schroeder, 1995; Weinberg, 1995; Schwartz, 2014).

Kata medan berarti besaran fisik yang nilainya diberikan di setiap titik ruang-waktu. Contoh paling akrab adalah medan suhu di sebuah ruangan: di setiap titik ruang dan setiap waktu, ada nilai suhu tertentu. Dalam fisika klasik, medan elektromagnetik juga demikian: di setiap titik ruang-waktu terdapat medan listrik dan medan magnet. Teori medan kuantum memulai dari gagasan serupa, tetapi kemudian melakukan langkah kuantum: medan tidak lagi hanya dianggap sebagai fungsi biasa, melainkan sebagai objek yang memiliki fluktuasi kuantum dan dapat menciptakan atau memusnahkan kuantum energi yang kita sebut partikel.

Contoh sederhana akan membantu. Dalam mekanika kuantum biasa, osilator harmonik—misalnya massa pada pegas ideal—memiliki tingkat energi diskrit. Energinya tidak dapat mengambil sembarang nilai, melainkan muncul dalam paket-paket tertentu. Teori medan kuantum dapat dipandang, secara intuitif, sebagai kumpulan osilator harmonik kuantum yang tak hingga banyaknya, satu untuk setiap mode gelombang medan. Jika sebuah mode medan elektromagnetik tereksitasi satu kuantum, kita menyebut kuantum itu foton. Jika medan elektron tereksitasi, kita menyebut eksitasinya elektron. Pernyataan “partikel adalah eksitasi medan” adalah salah satu cara paling ringkas untuk menggambarkan sudut pandang QFT, meskipun makna matematisnya baru akan menjadi jelas setelah kita membangun ruang Fock dan operator penciptaan-pemusnahan pada bab-bab berikutnya (Zee, 2010; Schwartz, 2014).

Mengapa kita tidak cukup memakai mekanika kuantum biasa? Jawabannya bukan karena mekanika kuantum biasa salah, melainkan karena wilayah berlakunya terbatas. Mekanika kuantum nonrelativistik sangat berhasil untuk atom hidrogen, molekul sederhana, dan banyak sistem energi rendah. Namun ketika energi cukup besar sehingga partikel dapat berubah menjadi partikel lain, atau ketika penciptaan dan pemusnahan pasangan partikel-antipartikel menjadi mungkin, jumlah partikel tidak lagi tetap. Dalam teori satu-partikel biasa, kita biasanya memulai dengan satu partikel dan tetap membicarakan satu partikel. Dalam proses relativistik, asumsi ini terlalu sempit.

Misalnya, elektron dan positron dapat beranihilasi menjadi foton, dan foton dengan kondisi kinematika yang sesuai dapat ikut dalam proses pembentukan pasangan elektron-positron. Satu foton bebas di ruang hampa tidak dapat sendirian berubah menjadi pasangan elektron-positron karena kekekalan energi-momentum tidak dapat dipenuhi; tetapi di dekat inti atom, atau dalam tumbukan dua foton, proses produksi pasangan dapat terjadi. Contoh ini menunjukkan dua hal sekaligus: relativitas khusus mengatur kinematika melalui energi-momentum, sedangkan mekanika kuantum memungkinkan amplitudo untuk proses yang mengubah jenis dan jumlah partikel. QFT dirancang untuk menangani situasi seperti ini secara alami (Peskin & Schroeder, 1995).

Buku ini akan membangun QFT secara bertahap. Kita tidak akan mulai dengan rumus yang tampak datang dari langit. Kita mulai dari pertanyaan sederhana: apa yang harus dipertahankan jika mekanika kuantum dan relativitas khusus sama-sama benar? Dari relativitas khusus, kita belajar bahwa hukum fisika harus menghormati simetri Lorentz, yaitu simetri yang menghubungkan pengamat-pengamat inersial berbeda. Dari mekanika kuantum, kita belajar bahwa hasil eksperimen dihitung dari amplitudo, operator, dan keadaan dalam ruang Hilbert. Dari teori medan klasik, kita belajar bahwa dinamika dapat diturunkan dari aksi, yaitu suatu besaran matematis yang dirancang agar lintasan atau konfigurasi fisik memenuhi prinsip stasioner. QFT muncul ketika ketiga bahasa ini disatukan.

Salah satu benang merah buku ini adalah hubungan antara simetri dan hukum kekekalan. Simetri berarti suatu perubahan yang tidak mengubah bentuk hukum fisika. Jika eksperimen yang sama dilakukan hari ini atau besok dan hukum dasarnya tetap sama, kita mengatakan ada simetri translasi waktu; konsekuensinya adalah kekekalan energi. Jika hukum fisika tidak berubah ketika seluruh sistem digeser di ruang, konsekuensinya adalah kekekalan momentum. Hubungan mendalam antara simetri kontinu dan hukum kekekalan diformalkan oleh teorema Noether, salah satu hasil paling penting dalam fisika teoretis modern (Noether, 1918; Weinberg, 1995). Dalam QFT, simetri bukan sekadar hiasan estetik; ia menentukan bentuk Lagrangian, membatasi jenis interaksi, dan sering kali menjadi petunjuk utama menuju teori yang konsisten.

Contoh pentingnya adalah elektrodinamika kuantum, atau QED. QED menjelaskan interaksi antara elektron, positron, dan foton. Prinsip yang memandu bentuk interaksinya adalah invariansi gauge $U(1)$. Istilah ini belum perlu dipahami penuh sekarang. Untuk sementara, anggaplah “gauge” sebagai cara mendeskripsikan medan dengan redundansi: ada lebih dari satu deskripsi matematis untuk keadaan fisik yang sama. Redundansi ini bukan kelemahan; justru ketika diperlakukan dengan benar, ia menghasilkan struktur interaksi elektromagnetik yang sangat ketat. Bab-bab tentang teori gauge akan menunjukkan mengapa foton muncul sebagai boson gauge dan mengapa identitas Ward membantu menjaga konsistensi perhitungan perturbatif (Peskin & Schroeder, 1995; Schwartz, 2014).

Benang merah kedua adalah hubungan antara teori dan besaran terukur. Dalam eksperimen, kita tidak melihat “Lagrangian” secara langsung. Kita mengukur hal-hal seperti laju peluruhan, penampang lintang, distribusi sudut, energi partikel keluar, atau korelasi antara detektor. QFT menyediakan jembatan dari prinsip dasar menuju angka yang dapat dibandingkan dengan data. Jembatan itu biasanya melalui amplitudo hamburan, matriks-S, ruang fase relativistik, dan diagram Feynman. Diagram Feynman bukan sekadar gambar; ia adalah cara ringkas untuk mengorganisasi suku-suku dalam ekspansi perturbatif, yaitu perhitungan yang dibangun sebagai deret dalam kekuatan interaksi (Feynman, 1949; Peskin & Schroeder, 1995).

Sebagai contoh, dalam proses ideal elektron dan positron yang beranihilasi menjadi pasangan muon-antimuon,

$$e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+,$$

QFT memberi resep untuk menulis amplitudo kuantum dari pertukaran foton virtual, lalu mengubah amplitudo itu menjadi penampang lintang. Kata virtual di sini berarti partikel internal dalam perhitungan perturbatif yang tidak harus memenuhi hubungan energi-momentum partikel bebas. Partikel virtual bukan partikel yang dapat ditangkap detektor sebagai objek bebas; ia adalah bagian dari struktur matematis amplitudo. Perbedaan seperti ini penting karena QFT penuh dengan istilah yang mudah disalahpahami jika dibaca terlalu harfiah.

Benang merah ketiga adalah renormalisasi. Pada awal belajar QFT, renormalisasi sering tampak seperti teknik memperbaiki ketakterhinggaan. Dalam perhitungan loop, integral atas momentum internal dapat menghasilkan divergensi ultraviolet, yaitu besaran yang menjadi tak hingga ketika kontribusi dari momentum sangat besar dimasukkan tanpa batas. Namun pemahaman modern tentang renormalisasi lebih dalam: teori fisika selalu didefinisikan pada skala energi tertentu, dan parameter seperti massa serta muatan harus dihubungkan dengan pengukuran pada skala tersebut. Gagasan bahwa interaksi efektif dapat berubah dengan skala energi adalah inti dari grup renormalisasi dan teori medan efektif (Wilson & Kogut, 1974; Weinberg, 1995).

Contoh intuitifnya begini. Ketika kita mengukur muatan elektron dari jauh, kita tidak hanya “melihat” elektron telanjang. Dalam QED, vakum kuantum dapat berfluktuasi melalui pasangan partikel-antipartikel virtual, dan fluktuasi ini memengaruhi bagaimana muatan tampak pada skala jarak berbeda. Bahasa teknisnya adalah running coupling: konstanta kopling yang efektif bergantung pada skala energi. Buku ini akan memperkenalkan ide tersebut secara hati-hati, mulai dari regularisasi, counterterm, skema renormalisasi, hingga fungsi beta.

Perjalanan buku ini juga akan membawa kita ke fermion dan teori gauge non-Abelian. Fermion adalah partikel dengan spin setengah-bilangan bulat, seperti elektron dan quark, yang mematuhi prinsip eksklusi Pauli. Dalam QFT, fermion memerlukan antikomutator, bukan komutator biasa, agar teori konsisten dengan statistik Fermi-Dirac dan kausalitas relativistik. Kemudian kita akan memasuki teori Yang-Mills, yaitu teori gauge non-Abelian yang menjadi dasar QCD dan sektor elektrolemah. Dalam teori non-Abelian, boson gauge dapat berinteraksi dengan sesamanya; inilah salah satu perbedaan mendasar antara QED dan QCD (Yang & Mills, 1954; Peskin & Schroeder, 1995).

Walaupun topiknya luas, cara belajar terbaik tetap sederhana: pahami satu struktur pada satu waktu. Ketika kita membahas medan skalar bebas, jangan terburu-buru memikirkan seluruh Model Standar. Ketika mempelajari propagator, fokuslah pada maknanya sebagai fungsi Green dan amplitudo korelasi. Ketika diagram Feynman muncul, ingat bahwa diagram itu adalah alat akuntansi untuk ekspansi matematis tertentu, bukan gambar lintasan literal partikel kecil di ruang. Ketika renormalisasi terasa abstrak, kembalilah ke pertanyaan praktis: parameter apa yang diukur, pada skala apa, dan prediksi apa yang kemudian dapat dihitung?

Secara matematis, buku ini akan memakai kalkulus multivariabel, aljabar linear, transformasi Fourier, dan sedikit teori grup. Namun setiap konsep fisik utama akan dibangun dari awal. Kita akan mendefinisikan empat-vektor sebelum memakainya secara berat. Kita akan mengingat kembali operator dan ruang Hilbert sebelum mengkuantisasi medan. Kita akan menurunkan persamaan Euler-Lagrange medan sebelum membicarakan teorema Noether. Kita akan membangun operator penciptaan dan pemusnahan sebelum menyebut ruang Fock sebagai rumah alami keadaan banyak-partikel. Dengan demikian, pembaca tidak hanya menghafal aturan Feynman, tetapi memahami dari mana aturan itu berasal dan kapan aturan itu sah digunakan.

Ada satu sikap penting yang sebaiknya dibawa sejak awal: QFT adalah teori yang sangat berhasil, tetapi bukan kumpulan mantra. Setiap rumus memiliki syarat pakai. Teori perturbasi berguna ketika kopling cukup kecil, tetapi dapat gagal dalam rezim kuat. Gauge fixing diperlukan untuk menghitung propagator medan gauge, tetapi besaran fisik tidak boleh bergantung pada pilihan gauge. Regularisasi membantu menangani divergensi, tetapi prediksi fisik harus dinyatakan melalui besaran terukur. Teori efektif bisa sangat akurat dalam domain energinya, meskipun tidak dimaksudkan sebagai deskripsi final pada semua skala.

Tujuan buku ini bukan membuat QFT tampak mudah secara palsu. QFT memang menuntut ketekunan. Tujuannya adalah membuat jalurnya terlihat: dari relativitas khusus dan mekanika kuantum, menuju medan klasik, kuantisasi, propagator, interaksi, diagram Feynman, observabel hamburan, integral lintasan, fermion, teori gauge, renormalisasi, hingga struktur Model Standar dan metode non-perturbatif. Jika dibaca perlahan, setiap bab akan menambah satu alat kerja. Pada akhir buku, Anda diharapkan mampu melihat sebuah Lagrangian, mengenali simetrinya, menurunkan aturan dasar perhitungannya, memahami apa yang dapat diukur, dan menilai keterbatasan pendekatan yang digunakan.

Kita mulai dari pertanyaan paling dasar: mengapa dunia relativistik kuantum lebih tepat dijelaskan oleh medan daripada oleh partikel tunggal? Jawaban bertahap atas pertanyaan itu akan membuka seluruh isi buku.

References

- Feynman, R. P. (1949). Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics. *Physical Review*, 76(6), 769-789.
- Noether, E. (1918). Invariante Variationsprobleme. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1918, 235-257.
- Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Addison-Wesley.
- Schwartz, M. D. (2014). *Quantum Field Theory and the Standard Model*. Cambridge University Press.
- Weinberg, S. (1995). *The Quantum Theory of Fields, Volume I: Foundations*. Cambridge University Press.
- Wilson, K. G., & Kogut, J. (1974). The Renormalization Group and the ϵ Expansion. *Physics Reports*, 12(2), 75-199.
- Yang, C. N., & Mills, R. L. (1954). Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance. *Physical Review*, 96(1), 191-195.
- Zee, A. (2010). *Quantum Field Theory in a Nutshell (2nd ed.)*. Princeton University Press.

Document information

Pendahuluan

Project	Teori Medan Kuantum
Document	Document 1.4
Author	Isti_26
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 22:33 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/teori-medan-kuantum/documents/pendahuluan/