

https://farid.ps/articles/physics_beyond_the_standard_model/id.html

Fisika di Luar Model Standar

Pada tahun 2012, ketika boson Higgs dikonfirmasi di Large Hadron Collider milik CERN, Model Standar (SM) secara teoretis telah lengkap. Setiap partikel yang diprediksi telah ditemukan. Persamaannya telah lulus setiap uji eksperimental dengan presisi yang luar biasa.

Namun, suasana dalam fisika bukanlah tentang penyelesaian, melainkan tentang ketidaklengkapan. Seperti hukum Newton sebelum Einstein atau fisika klasik sebelum mekanika kuantum, Model Standar terlalu sukses pada skala yang dapat kita uji, tetapi tidak mampu menjawab pertanyaan yang lebih mendalam. Itu adalah peta yang hampir sempurna – tetapi hanya untuk sebagian kecil dari lanskap.

Gravitasi: Gaya yang Hilang

Pelewat yang paling mencolok adalah gravitasi.

- SM menjelaskan tiga dari empat gaya fundamental yang diketahui: elektromagnetisme, gaya lemah, dan gaya kuat.
- Gravitasi, yang dijelaskan oleh **teori relativitas umum (GR)** Einstein, sepenuhnya absen.

Ini bukan sekadar kelalaian. Relativitas umum memperlakukan gravitasi sebagai kelengkungan ruang-waktu, sebuah medan geometris yang mulus, sementara SM memperlakukan gaya sebagai medan kuantum yang dimediasi oleh partikel. Upaya untuk mengkuantisasi gravitasi dengan cara yang sama menghasilkan nilai tak hingga yang tidak dapat dinormalisasi.

Model Standar dan GR bagaikan dua sistem operasi yang berbeda – brilian di domain masing-masing, tetapi pada dasarnya tidak kompatibel. Menyatukannya mungkin adalah tantangan terbesar dalam fisika saat ini.

Massa Neutrino

SM memprediksi bahwa neutrino tidak memiliki massa. Namun, eksperimen, dimulai dengan detektor Super-Kamiokande di Jepang (1998) dan dikonfirmasi di seluruh dunia, menunjukkan bahwa neutrino berosilasi antara jenis (elektron, muon, tau). Osilasi membutuhkan massa.

Ini adalah bukti pertama yang dikonfirmasi tentang fisika di luar Model Standar. Penemuan ini memenangkan Hadiah Nobel pada tahun 2015 untuk Kajita dan McDonald.

Neutrino sangat ringan, setidaknya satu juta kali lebih ringan dari elektron. Massa mereka tidak dijelaskan oleh SM – tetapi mereka dapat mengisyaratkan fisika baru, seperti

mekanisme seesaw, neutrino steril, atau hubungan dengan alam semesta awal. Dalam beberapa skenario, neutrino seesaw yang berat memungkinkan **leptogenesis**, di mana asimetri lepton di alam semesta awal diciptakan dan kemudian diubah menjadi **asimetri materi-antimateri** yang diamati.

Materi Gelap

Materi yang terlihat, yang dijelaskan oleh SM, menyusun kurang dari 5% alam semesta. Sisanya tidak terlihat.

- **Materi gelap** (~27% alam semesta) hanya terdeteksi melalui gravitasi: galaksi berputar lebih cepat dari yang diizinkan oleh materi yang terlihat, gugus galaksi membelokkan cahaya lebih dari yang seharusnya, dan latar belakang gelombang mikro kosmik membutuhkan massa tambahan yang tidak terlihat.
- Tidak ada partikel SM yang dapat menjelaskannya. Neutrino terlalu ringan dan cepat. Materi biasa terlalu langka.

Teori mengusulkan partikel baru: WIMP (partikel masif yang berinteraksi lemah), axion, neutrino steril, atau sesuatu yang lebih aneh. Namun, meskipun telah dicari selama puluhan tahun – detektor bawah tanah, eksperimen tabrakan, penelitian astrofisika – materi gelap tetap sulit dipahami.

Energi Gelap

Lebih misterius lagi adalah **energi gelap**, gaya yang mendorong ekspansi alam semesta yang dipercepat.

- Ditemukan pada tahun 1998 melalui pengamatan supernova, energi gelap menyusun ~68% alam semesta.
- Secara prinsip, ini dapat dijelaskan sebagai “energi vakum” dari medan kuantum. Namun, perhitungan QFT yang naif memprediksi kepadatan energi vakum yang 120 orde magnitudo terlalu besar – prediksi terburuk dalam fisika.

Masalah konstanta kosmologis ini mungkin merupakan konflik paling tajam antara teori medan kuantum dan gravitasi. Model Standar tidak memiliki penjelasan tentang energi gelap. Ini adalah celah besar dalam pemahaman kita tentang kosmos.

Masalah Hierarki

Misteri mendalam lainnya terletak pada boson Higgs itu sendiri.

Massa Higgs yang diukur adalah 125 GeV. Namun, koreksi kuantum seharusnya mendorongnya mendekati skala Planck (10^{19} GeV), kecuali jika terjadi pembatalan yang ajaib. Mengapa begitu ringan dibandingkan dengan skala energi alami gravitasi?

Ini adalah **masalah hierarki**: Higgs tampaknya disetel dengan sangat halus. Fisikawan menduga adanya fisika baru, seperti **supersimetri (SUSY)**, yang dapat menstabilkan massa Higgs dengan memperkenalkan partikel pendamping yang membantalkan koreksi

berbahaya. (Debat tentang **naturalitas** mencakup ide dari solusi dinamis hingga penalaran **antropik** dalam kemungkinan “lanskap” vakum.)

Asimetri Materi-Antimateri

SM mencakup beberapa pelanggaran CP, tetapi jauh dari cukup untuk menjelaskan mengapa alam semesta saat ini penuh dengan materi alih-alih jumlah yang sama antara materi dan antimateri. Seperti disebutkan di atas, mekanisme seperti **leptogenesis** (sering terkait dengan mekanisme seesaw untuk massa neutrino) memberikan jalur yang meyakinkan di mana fisika di luar SM memiringkan keseimbangan.

Gambar yang Indah namun Tidak Lengkap

Model Standar kadang-kadang disebut “teori paling sukses dalam fisika”. Prediksinya sesuai dengan eksperimen hingga 10-12 desimal. Ini menjelaskan hampir semua yang kita lihat di akselerator partikel dan laboratorium.

Namun, itu tidak lengkap:

- Ini mengabaikan gravitasi.
- Ini tidak dapat menjelaskan massa neutrino.
- Ini tidak dapat menjelaskan materi gelap atau energi gelap.
- Ini meninggalkan teka-teki mendalam seperti masalah hierarki dan asimetri materi-antimateri tanpa solusi.

Fisikawan kini menghadapi momen yang akrab dalam sejarah. Seperti mekanika Newton memberi jalan kepada relativitas, dan fisika klasik kepada mekanika kuantum, Model Standar akhirnya harus memberi jalan kepada sesuatu yang lebih mendalam.

Cawan Suci: Teori Penyatuan

Tujuan akhir adalah **Teori Penyatuan Besar (GUT)** atau bahkan **Teori Segalanya (ToE)**: sebuah kerangka yang menyatukan keempat gaya, menjelaskan semua partikel, dan bekerja secara konsisten dari skala terkecil (gravitasi kuantum) hingga terbesar (kosmologi).

Ini adalah Cawan Suci fisika modern. Itulah mengapa para peneliti mendorong akselerator ke energi yang lebih tinggi, membangun detektor neutrino masif, memetakan kosmos dengan teleskop, dan menciptakan matematika baru yang berani.

Bab-bab berikut akan mengeksplorasi kandidat utama:

- **Supersimetri (SUSY)** – simetri antara partikel materi dan gaya.
- **Teori String dan Teori M** – di mana partikel adalah string yang bergetar, dan graviton muncul secara alami.
- **Dimensi Ekstra** – dari ide awal Kaluza-Klein hingga model modern Randall-Sundrum.
- **Pendekatan Lain** – seperti gravitasi kuantum loop dan keamanan asimtotik.

Setiap ide ini tidak muncul sebagai dogma, melainkan sebagai sains pada puncaknya: memperhatikan celah, membangun teori baru, dan mengujinya terhadap realitas.

Supersimetri: Simetri Besar Berikutnya?

Fisika memiliki sejarah panjang penyatuan melalui simetri. Persamaan Maxwell menyatukan listrik dan magnetisme. Relativitas khusus menyatukan ruang dan waktu. Teori elektromagnetisme menyatukan dua dari empat gaya fundamental. Setiap langkah maju datang dari mengungkap simetri tersembunyi di alam.

Supersimetri – atau SUSY, seperti yang disebut dengan penuh kasih oleh fisikawan – adalah usulan berani bahwa simetri besar berikutnya menghubungkan dua kategori partikel yang tampaknya berbeda: **materi** dan **gaya**.

Fermion dan Boson: Materi vs. Gaya

Dalam Model Standar, partikel terbagi menjadi dua keluarga besar:

- **Fermion (spin 1/2):** Termasuk kuark dan lepton, blok bangunan materi. Spin setengah bilangan bulat mereka berarti mereka mematuhi prinsip eksklusi Pauli: tidak ada dua fermion identik yang dapat menempati keadaan yang sama. Ini menjelaskan mengapa atom memiliki cangkang terstruktur dan mengapa materi stabil.
- **Boson (spin bilangan bulat):** Termasuk foton, gluon, boson W dan Z, dan Higgs. Boson memediasi gaya. Berbeda dengan fermion, mereka dapat menumpuk dalam keadaan yang sama, yang menjelaskan keberadaan laser (foton) dan kondensat Bose-Einstein.

Singkatnya: fermion membentuk materi, boson membawa gaya.

Hipotesis Supersimetri

Supersimetri mengusulkan simetri yang menghubungkan fermion dan boson. Untuk setiap fermion yang diketahui, ada pasangan bosonik. Untuk setiap boson yang diketahui, ada pasangan fermionik.

- Kuark → **skuark**
- Lepton → **slepton**
- Gluon → **gluino**
- Sektor gauge/Higgs → **neutralino** (campuran bino, wino, higgsino; netral) dan **chargino** (campuran wino, higgsino; bermuatan)

(“Fotino” dan “zino” adalah nama panggilan lama untuk keadaan eigen gauge; eksperimen sebenarnya mencari **keadaan eigen massa** yang disebutkan di atas.)

Mengapa mengusulkan penggandaan radikal dunia partikel seperti itu? Karena SUSY menjanjikan solusi elegan untuk beberapa masalah terdalam yang ditinggalkan oleh

Model Standar.

Menyelesaikan Masalah Hierarki

Salah satu daya tarik terbesar SUSY adalah kemampuannya untuk menangani **masalah hierarki**: mengapa boson Higgs begitu ringan dibandingkan dengan skala Planck.

Dalam Model Standar, koreksi kuantum dari partikel virtual seharusnya mendorong massa Higgs ke nilai yang sangat besar. Supersimetri memperkenalkan spartikel yang kontribusinya membatalkan divergensi ini. Hasilnya: massa Higgs distabilkan secara alami tanpa penyesuaian halus (setidaknya dalam spektrum SUSY “alami”).

SUSY dan Penyatuan Besar

Motivasi lain untuk SUSY berasal dari penyatuan gaya.

- Ketika konstanta kopling dari gaya kuat, lemah, dan elektromagnetik dihitung ke energi yang lebih tinggi, dalam Model Standar mereka hampir, tetapi tidak sepenuhnya, bertemu di satu titik.
- Dalam SUSY, dengan kontribusi spartikel, kopling bertemu dengan indah sekitar 10^{16} GeV.

Ini menunjukkan bahwa pada energi yang sangat tinggi, ketiga gaya tersebut dapat bersatu dalam satu **Teori Penyatuan Besar (GUT)**.

SUSY sebagai Kandidat Materi Gelap

Supersimetri juga menyediakan kandidat alami untuk **materi gelap**.

Jika SUSY benar, salah satu spartikel harus stabil dan netral secara elektrik. Kandidat utama adalah **neutralino paling ringan**, campuran bino, wino, dan higgsino.

Neutralino hanya akan berinteraksi lemah, sesuai dengan profil WIMP (partikel masif yang berinteraksi lemah). Jika ditemukan, mereka bisa menjelaskan 27% materi yang hilang dari alam semesta.

Pencarian Eksperimental untuk SUSY

Selama beberapa dekade, fisikawan berharap partikel supersimetri akan muncul tepat di atas skala energi yang sudah dieksplorasi.

- **LEP (CERN, 1990-an)**: Tidak ada partikel SUSY hingga ~100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, 1990-an-2000-an)**: Tidak ada spartikel.
- **LHC (CERN, 2010-an-2020-an)**: Tabrakan proton-proton hingga **13,6 TeV** (desain: **14 TeV**). Meskipun pencarian besar-besaran, tidak ada bukti skuark, gluino, atau neutralino hingga skala multi-TeV.

Ketidadaan penemuan SUSY di LHC mengecewakan. Banyak versi SUSY yang paling sederhana, seperti “Model Standar Supersimetri Minimal” (MSSM), kini sangat dibatasi.

Spektrum “alami” didorong ke massa yang lebih berat, menyiratkan lebih banyak penyesuaian halus jika SUSY ada di dekat skala TeV.

Meski begitu, SUSY belum dikesampingkan. Model yang lebih kompleks memprediksi spartikel yang lebih berat atau lebih halus, mungkin di luar jangkauan LHC, atau dengan interaksi yang terlalu lemah untuk mudah dideteksi.

Keindahan Matematis SUSY

Di luar motivasi fenomenologisnya, SUSY memiliki keanggunan matematis yang mendalam.

- Ini adalah satu-satunya ekstensi simetri ruang-waktu yang mungkin, yang konsisten dengan relativitas dan mekanika kuantum.
- Teori supersimetri sering kali lebih dapat dihitung: mereka menjinakkan tak hingga dan mengungkap struktur tersembunyi dalam QFT.
- Dalam teori string, SUSY sangat penting untuk konsistensi: tanpa itu, teori mengandung takion dan patologi lainnya.

Meskipun alam tidak merealisasikan SUSY pada energi yang dapat diakses, matematikanya telah memperkaya fisika.

Status Supersimetri

Hari ini, SUSY menempati posisi yang aneh.

- Ini tetap menjadi salah satu kerangka paling meyakinkan untuk fisika di luar Model Standar.
- Ini menyelesaikan masalah hierarki, mendukung penyatuan, dan menawarkan kandidat untuk materi gelap.
- Namun, belum ada bukti eksperimental yang ditemukan.

Jika LHC dan penerusnya tidak menemukan apa-apa, SUSY mungkin hanya terealisasi pada skala energi jauh di luar jangkauan kita – atau mungkin alam memilih jalur yang sama sekali berbeda.

Sebuah Metode, Bukan Dogma

Supersimetri menggambarkan metode ilmiah dalam tindakan.

Fisikawan mengidentifikasi masalah: masalah hierarki, penyatuan, materi gelap. Mereka mengusulkan simetri baru yang berani yang menyelesaikan semuanya. Mereka merancang eksperimen untuk mengujinya. Hingga kini, hasilnya negatif – tetapi itu tidak berarti ide itu sia-sia. SUSY mempertajam alat kita, menjelaskan apa yang kita cari, dan memandu generasi penelitian.

Seperti eter atau epicycles sebelumnya, SUSY mungkin terbukti sebagai batu loncatan menuju kebenaran yang lebih mendalam, baik itu bertahan sebagai kata terakhir atau tidak.

Teori String dan Teori M

Fisika di luar Model Standar sering kali dimotivasi oleh tambalan: menyelesaikan masalah hierarki, menjelaskan materi gelap, menyatukan kopling gauge. Teori string berbeda. Ini tidak dimulai dengan teka-teki tertentu. Sebaliknya, ini dimulai dengan matematika – dan akhirnya membentuk kembali seluruh konsepsi kita tentang ruang, waktu, dan materi.

Asal-Usul: Teori yang Lahir dari Kegagalan

Teori string secara mengejutkan tidak dimulai sebagai teori segalanya, melainkan sebagai upaya gagal untuk memahami gaya nuklir kuat.

Pada akhir 1960-an, sebelum QCD sepenuhnya dikembangkan, fisikawan berusaha menjelaskan kebutuhan binatang hadron. Mereka memperhatikan pola dalam data hamburan yang menunjukkan bahwa resonansi dapat dimodelkan oleh string yang bergetar.

“Model resonansi dual,” yang diperkenalkan oleh Veneziano pada tahun 1968, menggambarkan interaksi kuat seolah-olah hadron adalah eksitasi dari string kecil. Itu elegan tetapi segera ditinggalkan begitu QCD muncul sebagai teori sejati dari gaya kuat.

Namun, teori string menolak untuk mati. Tersembunyi dalam persamaannya terdapat fitur luar biasa yang tampaknya menunjukkan jauh di luar fisika nuklir.

Penemuan yang Mengejutkan: Graviton

Ketika para teoretikus mengkuantisasi getaran string, mereka menemukan bahwa spektrum secara tak terelakkan mencakup **partikel tanpa massa dengan spin-2**.

Ini mengejutkan. Teori medan kuantum telah menunjukkan bahwa partikel tanpa massa dengan spin-2 adalah unik: itu harus menjadi kuantum gravitasi, **graviton**.

Seperti yang kemudian dicatat oleh John Schwarz: *“Tapi fakta mengejutkan muncul: matematika teori string secara tak terelakkan mengandung partikel tanpa massa dengan spin-2 – sebuah graviton.”*

Apa yang dimulai sebagai teori hadron secara tidak sengaja menghasilkan blok bangunan gravitasi kuantum.

Ide Inti: String, Bukan Titik

Pada intinya, teori string menggantikan partikel titik dengan objek satu dimensi kecil: string.

- String bisa **terbuka** (dengan dua ujung) atau **tertutup** (loop).
- Mode getaran string yang berbeda sesuai dengan partikel yang berbeda.
 - Getaran tertentu bisa muncul sebagai foton.
 - Lain sebagai gluon.

- Lain sebagai kuark.
- Dan satu mode, secara tak terelakkan, sebagai graviton.

Perubahan sederhana ini – dari titik ke string – menyelesaikan banyak tak hingga yang mengganggu gravitasi kuantum. Ukuran string yang terbatas mengaburkan interaksi yang sebaliknya akan meledak pada jarak nol.

Supersimetri dan Superstring

Versi awal teori string bermasalah: mereka mengandung takion (ketidakstabilan) dan membutuhkan fitur yang tidak realistik. Terobosan datang dengan pengenalan **supersimetri**, yang mengarah ke **teori superstring** pada 1970-an dan 1980-an.

Superstring menghilangkan takion, memasukkan fermion, dan membawa konsistensi matematis baru.

Tapi ada kendala: teori string hanya bekerja dalam dimensi yang lebih tinggi. Secara spesifik, **10 dimensi ruang-waktu**.

- Empat yang kita lihat (tiga ruang, satu waktu).
- Enam lainnya, dipadatkan atau digulung dalam skala kecil, tak terlihat untuk eksperimen saat ini.

Ide ini, meskipun tampak radikal, bukanlah hal baru. Pada 1920-an, **teori Kaluza-Klein** telah mengisyaratkan bahwa dimensi ekstra dapat menyatukan gravitasi dan elektromagnetisme. Teori string menghidupkan kembali dan memperluas ide ini secara besar-besaran.

Lima Teori String

Pada pertengahan 1980-an, fisikawan menemukan bahwa teori string bukanlah satu, melainkan hadir dalam **lima versi berbeda**:

1. **Tipe I** – String terbuka dan tertutup, termasuk string yang diorientasikan dan tidak diorientasikan.
2. **Tipe IIA** – String tertutup, diorientasikan, tidak kiral.
3. **Tipe IIB** – String tertutup, diorientasikan, kiral.
4. **Heterotik $SO(32)$** – String tertutup dengan konstruksi hibrida.
5. **Heterotik $E_8 \times E_8$** – Versi yang sangat simetris, kemudian krusial untuk terhubung dengan fisika partikel realistik.

Masing-masing tampak konsisten secara matematis, tetapi mengapa alam memilih satu?

Revolusi Superstring Pertama

Pada tahun 1984, Michael Green dan John Schwarz menunjukkan bahwa teori string dapat secara otomatis membatalkan anomali kuantum – sesuatu yang harus dirancang dengan hati-hati oleh teori medan kuantum. Penemuan ini memicu **revolusi superstring**

pertama, dengan ribuan fisikawan beralih ke teori string sebagai kandidat untuk teori penyatuan semua gaya.

Ini adalah kerangka serius pertama di mana gravitasi kuantum tidak hanya konsisten tetapi tak terelakkan.

Revolusi Superstring Kedua: Teori M

Pada pertengahan 1990-an, revolusi kedua terjadi. Edward Witten dan lainnya menemukan bahwa lima teori string yang berbeda bukanlah saingan, melainkan batas-batas berbeda dari satu teori yang lebih mendalam: **teori M**.

Teori M diyakini ada dalam **11 dimensi** dan mencakup tidak hanya string, tetapi juga objek berdimensi lebih tinggi yang disebut **brane** (kependekan dari membran).

- Brane 1-dimensi = string.
- Brane 2-dimensi = membran.
- Brane berdimensi lebih tinggi hingga 9 dimensi spasial.

Brane ini memunculkan kemungkinan baru yang kaya: seluruh alam semesta bisa ada sebagai 3-brane yang mengambang dalam ruang berdimensi lebih tinggi, dengan gravitasi bocor ke dalam volume sementara gaya lain tetap terbatas. Gambaran ini menginspirasi model dimensi ekstra modern seperti **Randall-Sundrum**.

Contoh Menonjol: Kaluza-Klein dan Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (1920-an)**: Mengusulkan dimensi kelima ekstra untuk menyatukan gravitasi dan elektromagnetisme. Ide ini disimpan selama beberapa dekade, tetapi teori string menghidupkannya kembali dalam bentuk yang lebih besar. Dimensi ekstra yang dipadatkan tetap menjadi fitur inti model string.
- **Randall-Sundrum (1999)**: Mengusulkan dimensi ekstra “melengkung”, di mana alam semesta kita adalah 3-brane yang tertanam dalam dimensi lebih tinggi. Gravitasi menyebar ke dalam volume, menjelaskan mengapa itu lebih lemah dari gaya lain. Model seperti itu memprediksi sinyal yang mungkin ada di akselerator partikel atau penyimpangan dari hukum Newton pada jarak sangat pendek.

Petunjuk Eksperimental dan Tantangan

Teori string membuat klaim berani, tetapi mengujinya sangat sulit.

- **Dimensi Ekstra**: Bisa terungkap melalui sinyal energi yang hilang atau **eksitasi Kaluza-Klein** – berpotensi untuk **graviton atau bahkan medan Model Standar**, tergantung pada pengaturan. Batasan akselerator biasanya mencapai kisaran **multi-TeV**.
- **Graviton**: Partikel tanpa massa dengan spin-2 diprediksi, tetapi mendeteksi graviton tunggal berada di luar teknologi yang realistik. Efek tidak langsung, seperti penyimpangan dalam gelombang gravitasi, dimungkinkan.

- **Supersimetri:** Teori string membutuhkan SUSY pada skala tertentu, tetapi LHC belum menemukan spartikel.
- **Kosmologi:** Alam semesta awal, inflasi, dan latar belakang gelombang mikro kosmik dapat mengandung jejak fisika string, meskipun hasilnya sejauh ini tidak jelas.

Meskipun ada tantangan, teori string telah memberikan lahan subur untuk matematika, menginspirasi kemajuan dalam geometri, topologi, dan dualitas seperti AdS/CFT (yang menghubungkan gravitasi dalam dimensi lebih tinggi dengan teori medan kuantum tanpa gravitasi).

Keindahan dan Kontroversi

Pendukung berpendapat bahwa teori string adalah jalur paling menjanjikan menuju teori penyatuan: ini mencakup gravitasi kuantum, menyatukan semua gaya, dan menjelaskan mengapa graviton harus ada.

Kritikus berpendapat bahwa tanpa konfirmasi eksperimental, teori string berisiko terputus dari sains empiris. "Lanskap" solusi yang mungkin sangat besar (hingga 10^{500}) membuat sulit untuk menarik prediksi unik.

Kedua belah pihak setuju pada satu hal: teori string telah mengubah cara kita berpikir tentang fisika, memberikan bahasa baru untuk penyatuan.

Menuju Teori Segalanya

Jika supersimetri adalah langkah berikutnya di luar Model Standar, teori string adalah langkah berikutnya: kandidat untuk **Teori Segalanya** yang telah lama dicari.

Klaimnya yang paling berani bukan hanya bahwa ia mencakup Model Standar dan gravitasi, tetapi bahwa ini adalah konsekuensi tak terelakkan dari string yang bergetar dalam dimensi lebih tinggi. Graviton bukanlah tambahan – itu terintegrasi.

Apakah alam telah memilih jalur ini masih harus ditemukan.

Menjelajahi Batas: Eksperimen di Luar Model Standar

Teori adalah darah kehidupan fisika, tetapi eksperimen adalah detak jantungnya. Supersimetri, teori string, dan dimensi ekstra adalah konstruksi matematis yang indah, tetapi mereka hidup atau mati berdasarkan bukti. Jika mereka ingin lebih dari sekadar spekulasi, mereka harus meninggalkan jejak dalam data.

Fisikawan telah merancang cara-cara cerdas untuk mencari jejak ini – di akselerator, di kosmos, dan dalam struktur ruang-waktu itu sendiri.

Akselerator: Berburu Spartikel dan Graviton

Large Hadron Collider (LHC) di CERN adalah akselerator partikel paling kuat di dunia, menabrakkan proton pada energi hingga **13,6 TeV** (desain: **14 TeV**). Ini telah menjadi alat

utama umat manusia untuk menjelajahi fisika di luar Model Standar.

Supersimetri di LHC

- **Pencarian Spartikel:** Eksperimen di ATLAS dan CMS telah meneliti data untuk mencari skuark, gluino, dan neutralino/chargino. Ini sering muncul sebagai tanda “energi yang hilang”, karena partikel SUSY lolos dari deteksi.
- **Hasil:** Tidak ada partikel SUSY yang dikonfirmasi ditemukan hingga skala multi-TeV. Ini telah menyingkirkan banyak versi SUSY yang paling sederhana dan mendorong SUSY “alami” ke wilayah yang lebih berat dan lebih disetel halus.

Graviton dan Dimensi Ekstra

- **Mode Kaluza–Klein:** Jika dimensi ekstra ada, **graviton atau bahkan medan SM** bisa muncul sebagai eksitasi KK yang masif, dapat dideteksi sebagai resonansi dalam saluran dilepton, difoton, atau dijet.
- **Sinyal Randall–Sundrum:** Dimensi ekstra yang melengkung dapat menghasilkan resonansi graviton dengan pola sudut spin-2 yang khas.
- **Hasil:** Pencarian LHC belum menemukan bukti sejauh ini, tetapi telah mendorong batas hingga kisaran **multi-TeV**, membatasi ukuran, distorsi, dan geometri dimensi ekstra.

Lubang Hitam Mikro

Beberapa teori menyarankan bahwa jika gravitasi menjadi kuat pada skala TeV, lubang hitam kecil dapat terbentuk dalam tabrakan LHC, menguap dalam ledakan partikel. Tidak ada peristiwa seperti itu yang terlihat.

Eksperimen Presisi: Menguji Gravitasi pada Skala Kecil

Jika dimensi ekstra ada, hukum gravitasi Newton mungkin gagal pada jarak pendek.

- **Eksperimen Keseimbangan Torsi (“Eöt-Wash”):** Menguji hukum kuadrat terbalik hingga skala **submilimeter** – saat ini **puluhan mikron ($\sim 50 \mu\text{m}$)**.
- **Hasil:** Tidak ada penyimpangan yang ditemukan. Eksperimen ini **menyingkirkan** kelas luas skenario dimensi ekstra dengan panjang karakteristik **lebih besar dari $\sim 10^{-4} \text{ m}$** (tergantung model).

Eksperimen meja ini sangat sensitif, menjelajahi skala yang tidak dapat diakses oleh akselerator.

Gelombang Gravitasi: Jendela Baru ke Gravitasi Kuantum

Penemuan gelombang gravitasi oleh LIGO pada tahun 2015 membuka batas baru.

- **Polarisasi Ekstra / Penyebaran yang Dimodifikasi:** Beberapa model gravitasi kuantum atau dimensi ekstra memprediksi penyimpangan dari GR (polarisasi tambahan, dispersi, atau ringdown yang dimodifikasi).

- **Spektroskopi Ringdown:** “Dering” lubang hitam setelah penggabungan dapat mengungkapkan penyimpangan halus dari GR.
- **Gelombang Gravitasi Primordial:** Riak dari Big Bang dapat membawa jejak fisika string, dapat dideteksi oleh observatorium masa depan seperti LISA atau Teleskop Einstein.

Hingga kini, pengamatan sesuai dengan GR dalam ketidakpastian saat ini, tetapi presisi yang lebih tinggi dapat mengungkapkan kejutan.

Kosmologi: Alam Semesta sebagai Laboratorium

Kosmos itu sendiri adalah akselerator partikel utama.

- **Latar Belakang Gelombang Mikro Kosmik (CMB):** Fluktuasi kecil memetakan alam semesta awal. Beberapa model string memprediksi tanda spesifik, seperti fitur non-Gaussian atau karakteristik osilasi.
- **Inflasi:** Ekspansi cepat alam semesta mungkin didorong oleh medan yang terkait dengan teori string. Mendeteksi mode B primordial dalam CMB akan menjadi petunjuk kuat.
- **Pencarian Materi Gelap:** Neutralino dari SUSY adalah kandidat utama untuk materi gelap. Eksperimen seperti XENONnT, LUX-ZEPLIN, dan PandaX mencari WIMP melalui reaksi nuklir.
- **Axion:** Teori string juga memprediksi partikel mirip axion, yang dapat dideteksi melalui rongga resonansi atau pengamatan astrofisika.

Hingga kini, langit sunyi. Materi gelap tetap tidak terdeteksi, dan data kosmologi sesuai dengan model Λ CDM tanpa jejak string yang jelas.

Status Saat Ini: Pembatasan, Bukan Konfirmasi

Puluhan tahun pencarian belum mengkonfirmasi SUSY, dimensi ekstra, atau sinyal string. Tapi ketiadaan bukti bukanlah bukti ketiadaan:

- SUSY mungkin ada pada skala di luar jangkauan LHC atau dalam spektrum yang kurang mencolok; hasil nol sejauh ini **mendukung versi yang lebih disetel halus (“kurang alami”)** jika SUSY berada di dekat skala TeV.
- Dimensi ekstra mungkin lebih kecil, lebih terdistorsi, atau sebaliknya tersembunyi dari probe saat ini.
- Teori string mungkin hanya meninggalkan jejak yang dapat dideteksi di alam semesta yang sangat awal, yang hanya dapat diakses melalui kosmologi.

Beberapa **anomal presisi** (misalnya, pengukuran **(g-2)** muon dan beberapa ketegangan dalam **fisika rasa**) tetap **menarik tetapi belum terselesaikan**; mereka memotivasi pengawasan terus-menerus tanpa belum menggulingkan SM.

Yang telah dilakukan oleh eksperimen adalah **mempersempit ruang parameter**. Mereka telah memberitahu kita di mana SUSY tidak berada, seberapa kecil dimensi ekstra harus, dan seberapa kuat materi gelap dapat atau tidak dapat berinteraksi.

Jalan ke Depan

Eksperimen masa depan menjanjikan untuk menyelami lebih dalam:

- **LHC Luminositas Tinggi (HL-LHC):** Akan mengumpulkan $\sim 10\times$ lebih banyak data, menjelajahi SUSY hingga massa yang lebih tinggi dan proses langka.
- **Future Circular Collider (FCC-hh):** Usulan akselerator 100 TeV, cukup kuat untuk menjelajahi skala energi di mana fisika GUT mungkin muncul.
- **LISA (2030-an):** Observatorium gelombang gravitasi berbasis ruang, sensitif terhadap sinyal primordial dari alam semesta awal.
- **Detektor Materi Gelap Generasi Berikutnya:** Dengan sensitivitas terhadap sinyal lemah, mereka akhirnya bisa menangkap WIMP atau axion.

Sains sebagai Perjalanan

Kisah eksperimental fisika di luar Model Standar bukanlah tentang kegagalan, melainkan tentang proses.

- Hasil nol menyingkirkan model sederhana dan mempertajam teori kita.
- Setiap pembatasan memandu kita menuju kerangka yang lebih halus dan prediktif.
- Ketiadaan SUSY atau dimensi ekstra pada skala TeV tidak membunuh ide-ide tersebut – itu mendorong mereka ke wilayah baru.

Seperti eksperimen foil emas Rutherford menghancurkan model puding plum, atau LIGO menghilangkan keraguan tentang gelombang gravitasi, penemuan besar berikutnya bisa datang tiba-tiba – dan mengubah segalanya.

Menuju Teori Segalanya

Selama berabad-abad, fisika telah maju melalui penyatuan. Newton menyatukan langit dan bumi di bawah satu hukum gravitasi. Maxwell menyatukan listrik dan magnetisme. Einstein menyatukan ruang dan waktu. Teori elektrolemah menunjukkan bahwa dua gaya yang sangat berbeda adalah aspek dari satu.

Langkah berikutnya adalah yang paling berani sejauh ini: menyatukan **keempat interaksi fundamental** – kuat, lemah, elektromagnetik, dan gravitasi – dalam satu kerangka yang konsisten. Ini adalah Cawan Suci fisika: **Teori Segalanya (ToE)**.

Mengapa ToE Penting

Penyatuan lengkap bukan hanya keanggunan filosofis; itu menangani masalah praktis dan konseptual yang mendalam:

- **Gravitasi Kuantum:** Relativitas umum gagal pada skala Planck (10^{19} GeV). Hanya teori gravitasi kuantum yang dapat menjelaskan lubang hitam dan singularitas Big Bang.
- **Naturalitas dan Penyesuaian Halus:** Masalah hierarki dan masalah konstanta kosmologis menuntut penjelasan yang lebih mendalam.

- **Parameter Model Standar:** Mengapa partikel memiliki massa dan muatan yang mereka miliki? Mengapa tiga generasi kuark dan lepton? ToE bisa menjelaskan misteri ini.
- **Kosmologi:** Materi gelap, energi gelap, dan inflasi semuanya mungkin terkait dengan fisika pada skala penyatuan.

ToE tidak hanya akan menyatukan gaya – itu akan menyatukan skala, dari string terkecil dalam teori kuantum hingga struktur kosmik terbesar.

Supersimetri dan Penyatuan Besar

Supersimetri (SUSY), jika direalisasikan di alam, menyediakan batu loncatan menuju ToE.

- **Masalah Hierarki Terselesaikan:** Spartikel membantalkan koreksi divergen pada massa Higgs.
- **Kopling Gauge Disatukan:** Dengan SUSY, kekuatan ketiga gaya konvergen dengan indah pada 10^{16} GeV, menyarankan **Teori Penyatuan Besar (GUT)**.
- **Kandidat Materi Gelap:** Neutralino memberikan penjelasan alami untuk materi gelap kosmik.

GUT yang terinspirasi oleh SUSY (seperti SU(5), SO(10), atau E_6) membayangkan bahwa pada energi ultra-tinggi, kuark dan lepton disatukan dalam multiplet yang lebih besar, dan gaya-gaya menyatu dalam satu grup gauge.

Tapi SUSY belum muncul dalam eksperimen. Jika itu hanya ada pada skala di luar jangkauan kita, kekuatan penyatunya mungkin tetap menggoda tetapi tersembunyi.

Teori String: Gravitasi Kuantum dan Graviton

Teori string melangkah lebih jauh. Alih-alih menambal Model Standar, ia menulis ulang fondasinya:

- **String, Bukan Titik:** Semua partikel adalah getaran dari string kecil.
- **Graviton Muncul Secara Alami:** Eksitasi tanpa massa dengan spin-2 tak terelakkan, yang berarti gravitasi kuantum terintegrasi.
- **Penyatuan:** Mode getaran yang berbeda menghasilkan semua partikel yang dikenal – kuark, lepton, boson gauge, Higgs – dalam satu kerangka.
- **Dimensi Ekstra:** Teori string membutuhkan 10 dimensi ruang-waktu; teori M membutuhkan 11, dengan dimensi tersembunyi yang dipadatkan atau terdistorsi.

Dalam visi ini, penyatuan bukanlah kebetulan – itu adalah geometri. Gaya berbeda karena string bergetar dengan cara yang berbeda, dibentuk oleh topologi dimensi ekstra.

Teori M dan Dunia Brane

Penemuan bahwa lima teori string terhubung oleh dualitas mengarah ke teori M, kerangka yang lebih megah:

- Mencakup string, membran, dan brane berdimensi lebih tinggi.

- Menyarankan bahwa alam semesta kita bisa menjadi 3-brane yang tertanam dalam ruang berdimensi lebih tinggi.
- Menawarkan penjelasan alami mengapa gravitasi lebih lemah (itu menyebar ke dimensi ekstra) dan bagaimana beberapa alam semesta bisa ada dalam “multiverse”.

Teori M masih belum lengkap, tetapi mewakili langkah paling ambisius yang pernah dicoba menuju ToE.

Jalur Lain menuju Gravitasi Kuantum

Teori string dan teori M bukan satu-satunya jalur. Fisikawan menjelajahi beberapa kerangka, masing-masing dengan kekuatan berbeda:

- **Gravitasi Kuantum Loop (LQG):** Mencoba mengkuantisasi ruang-waktu secara langsung, memprediksi bahwa ruang diskrit pada skala Planck.
- **Keamanan Asimtotik:** Menyarankan bahwa gravitasi dapat berperilaku baik pada energi tinggi karena titik tetap yang tidak sepele.
- **Triangulasi Dinamis Kausal (CDT):** Membangun ruang-waktu dari blok bangunan geometris sederhana.
- **Teori Twistor dan Amplituhedra:** Kerangka matematis baru yang membayangkan ulang ruang-waktu dan amplitudo hamburan.

Meskipun belum ada yang menyaingi cakupan penyatuan teori string, mereka menggambarkan kekayaan pencarian.

Peran Eksperimen

ToE pada akhirnya harus dapat diuji. Meskipun skala Planck jauh di luar eksperimen saat ini, fisikawan mencari bukti tidak langsung:

- **Akselerator:** Partikel SUSY, dimensi ekstra, atau lubang hitam mikro.
- **Uji Presisi:** Penyimpangan dari hukum Newton pada skala pendek.
- **Gelombang Gravitasi:** Polarisasi eksotis atau gema dari dimensi lebih tinggi.
- **Kosmologi:** Jejak inflasi, kandidat materi gelap, atau axion yang diprediksi oleh teori string.

Hingga kini, ToE tetap di luar jangkauan, tetapi setiap hasil nol memangkas kemungkinan.

Keindahan dan Tantangan

ToE sejati tidak hanya akan menyatukan fisika – itu akan menyatukan **pengetahuan manusia**. Ini akan menghubungkan mekanika kuantum dan relativitas, mikro dan makro, partikel dan kosmos.

Namun, itu menghadapi paradoks: skala tempat penyatuan terjadi mungkin selamanya di luar jangkauan eksperimental. Akselerator 100 TeV hanya menjelajahi sebagian kecil dari jalan menuju skala Planck. Kita mungkin harus bergantung pada kosmologi, konsistensi matematis, atau tanda-tanda tidak langsung.

Mimpi itu tetap hidup karena keanggunan mendalam dari kerangka tersebut. Seperti yang dicatat Witten, teori string bukan hanya “sekumpulan persamaan” tetapi “kerangka baru untuk fisika”.

Sains sebagai Metode, Bukan Dogma

Pencarian ToE bukan tentang menyatakan teori string, SUSY, atau ide tunggal apa pun sebagai “benar”. Ini tentang **metode ilmiah**:

- Mengidentifikasi celah dalam teori yang ada.
- Mengusulkan kerangka baru yang berani.
- Mengujinya terhadap realitas, menolak atau memperbaiki sesuai kebutuhan.

Kisah ini jauh dari selesai. Tapi justru keterbukaan ini – penolakan untuk menganggap teori apa pun sebagai suci – yang membuat fisika menjadi sains yang hidup, bukan dogma.

Cakrawala di Depan

Abad berikutnya dalam fisika mungkin akan mengungkapkan:

- Bukti untuk supersimetri atau alternatifnya.
- Data kosmologi yang mengkonfirmasi atau menyangkal prediksi string.
- Reformulasi yang lebih mendalam dari ruang-waktu itu sendiri.

Atau mungkin ToE sejati adalah sesuatu yang belum pernah dibayangkan oleh siapa pun.

Tapi pencarian itu sendiri – dorongan untuk menyatukan, menjelaskan, melihat alam secara keseluruhan – adalah bagian dari kemanusiaan seperti halnya persamaan itu sendiri.

Referensi dan Bacaan Lanjutan

Supersimetri dan Penyatuan Besar

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). “Unity of All Elementary-Particle Forces.” *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Teori String dan Teori M

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Jilid 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Jilid 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). “String Theory Dynamics in Various Dimensions.” *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.

- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Gravitasi Kuantum Loop dan Alternatif

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Batas Eksperimental

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Narasi Populer yang Dapat Diakses

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.