https://farid.ps/articles/equation_of_everything/ar.html

النموذج القياسي: مقدمة فنية عن فهمنا الحالي للكون

على أعلى مستوى من التجريد، يمكن تلخيص معرفتنا بالكون المادي في تعبير رمزي واحد. مكتوب بلغة التكاملات المسارية، يقرأ كالتالي:

$$W = \int_{k<\Lambda} [Dg][DA][D\psi][D\Phi] \exp\left\{ i \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{m_p^2}{2} R - \frac{1}{4} F^a_{\mu\nu} F^{a\mu\nu} + i\bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i + \left(\bar{\psi}^i_L V_{ij} \Phi \psi^j_R + h.c. \right) - |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi) \right] \right\}.$$

هذا التعبير، الكثيف والمضغوط، هو **الشكل التكاملي المسار للنموذج القياسي بالإضافة إلى الجاذبية**. يوحد ميكانيكا الكم، الزمكان، المادة، القوى، وتوليد الكتلة في إطار واحد. دعونا نحلله جزءًا جزءًا.

1. ميكانيكا الكم: التكامل المسار

العامل الأولي

$$\mathbf{W = \int [Dg][DA][D\psi][D\Phi]\ e^{iS}}$$

هو **الدالة التوليدية** لنظرية الحقل الكمي.
يوضح أنه لحساب أي عملية، يجب جمع **جميع التكوينات الميدانية الممكنة**: الهندسات $\mathbf{g}$، الحقول المقاسية $\mathbf{A}$، حقول الفيرميون $\boldsymbol{\psi}$، وحقل هيغز $\boldsymbol{\Phi}$. كل تكوين يساهم بوزن $\mathbf{e^{iS}}$، حيث $\mathbf{S}$ هو الفعل.

هذه هي جوهر **ميكانيكا الكم الممتدة إلى الحقول**: الواقع هو نمط التداخل لجميع التواريخ الممكنة.

2. الزمكان والجاذبية

الحد

$$\frac{m_p^2}{2} R$$

يمثل **فعل أينشتاين-هيلبرت**، حيث $\mathbf{R}$ هو انحناء ريتشي العددي و$\mathbf{m_p}$ هي كتلة بلانك المختزلة.
يُشفر **النسبية العامة**: الزمكان ديناميكي، ينحني بوجود الطاقة والزخم.

على الرغم من أن الاتساق الكمي للجاذبية لا يزال غير محلول، فإن إدراج هذا الحد يعبر عن أفضل نظرية فعالة للزمكان لدينا.

3. الحقول المقاسية: القوى الأخرى

$$-\frac{1}{4} F^a_{\mu\nu} F^{a\mu\nu}$$

هذا الحد المضغوط يُشفر ديناميكيات الحقول المقاسية: الغلوونات (القوة القوية)، بوزونات W وZ (القوة الضعيفة)، والفوتون (الكهرومغناطيسية). الرمز $\mathbf{F_{\mu\nu}{}^{a}}$ يعمم موتر الحقل الكهرومغناطيسي إلى حقول يانغ-ميلز غير الأبلية.

من هذا الهيكل الواحد، يمكن استنباط **معادلات ماكسويل** في الحد الأبلي، بالإضافة إلى الآلية الكاملة لديناميكا الكم اللونية (QCD) والنظرية الكهروضعيفة.

4. حقول المادة

$$\mathbf{i\bar{\psi}^{i}\gamma^{\mu}D_{\mu}\psi^{i}}$$

هذا هو **فعل ديراك** للفيرميونات: الكواركات واللبتونات. المؤشر $\mathbf{i}$ يمتد على ثلاثة أجيال.
المشتق التفاضلي التآثري $\mathbf{D_{\mu}}$ يربط حقول المادة بالحقول المقاسية، مما يضمن الاتساق مع تناظرات النموذج القياسي.

هذا هو البيان الرياضي لكيفية انتشار جسيمات المادة وتفاعلها مع القوى.

5. اقترانات يوكاوا

$$\mathbf{.\bar{\psi}_L{}^{i}V_{ij}\Phi\psi_R{}^{j} + h.c}$$

هذه المصطلحات تصف **تفاعلات يوكاوا**: اقترانات الفيرميونات بحقل هيغز $\mathbf{\Phi}$.
بمجرد أن يكتسب حقل هيغز قيمة توقع فراغية، تُترجم هذه التفاعلات إلى **كتل الفيرميونات**.

المعاملات $\mathbf{V_{ij}}$ تُشفر هيكلية خلط النكهات (مثل مصفوفة CKM للكواركات).

6. قطاع هيغز

$$\mathbf{D_{\mu}\Phi|^{2} - V(\Phi)| -}$$

هنا يكمن حقل هيغز نفسه.
الحد الحركي $\mathbf{|D_{\mu}\Phi|^{2}}$ يربطه بالبوزونات المقاسية، بينما الجهد

$$\mathbf{V(\Phi) = \mu^{2}\Phi^{\dagger}\Phi + \lambda(\Phi^{\dagger}\Phi)^{2}}$$

يحرك **كسر التناظر التلقائي**.
هذا يكسر $\mathbf{SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}}$، مما يعطي كتلة لبوزونات W وZ بينما يترك الفوتون بلا كتلة.

اكتشاف بوزون هيغز في CERN عام 2012 أكد هذا الإطار.

7. البيان الموحد

مجتمعة، يعبر هذا الفعل عن:

- **ميكانيكا الكم** عبر التكامل المسار.
- **الزمكان والجاذبية** عبر حد أينشتاين-هيلبرت.
- **التفاعلات المقاسية** (القوية، الضعيفة، الكهرومغناطيسية).
- **حقول المادة** (الكواركات واللبتونات).
- **توليد الكتلة** من خلال آلية هيغز واقترانات يوكاوا.

ليست هذه "نظرية كل شيء" النهائية — فهي تتجاهل المادة المظلمة، الطاقة المظلمة، ونظرية كمية كاملة للجاذبية — لكنها **أكثر وصف كامل للواقع حققته البشرية حتى الآن.**

الخاتمة

إذا سألت ذكاء آخر عن وصفنا لقوانين الطبيعة، سنقدم هذه المعادلة.

ليست شعرًا، لكنها تحمل جمالًا عميقًا: تعبير واحد يُشفر ديناميكيات الفضاء، الزمن، المادة، والتفاعل.

هذا هو **فهمنا الحالي للكون**، مكثف في الرياضيات.