https://farid.ps/articles/physics_before_the_standard_model/ur.html

معیاری ماڈل سے پہلے کی طبیعیات

انیسویں صدی کے اختتام تک، طبیعیات تقریباً مکمل دکھائی دیتی تھی۔ نیوٹن کے حرکت اور کشش ثقل کے قوانین دو صدیوں سے زائد عرصے تک بغیر کسی چیلنج کے برقرار رہے۔ میکسویل کے مساوات نے بجلی اور مقناطیسیت کو ایک واحد برقی مقناطیسی میدان میں متحد کیا۔ حرارت، انجنوں اور اینٹروپی کو تھرموڈائنامکس نے واضح کیا۔ 1890 کی دہائی میں ایک پر اعتماد طبیعیات دان یہ یقین کر سکتا تھا کہ فطرت کے بنیادی اصول بنیادی طور پر معلوم ہیں، اور صرف چند معمولی تفصیلات باقی ہیں جنہیں پُر کرنا ہے۔

اس موڈ کو لارڈ کیلون نے 1900 میں مشہور طور پر خلاصہ کیا، جنہوں نے اعلان کیا کہ طبیعیات تقریباً ختم ہو چکی ہے، سوائے چند "افق پر بادل" کے۔ ستم ظریفی یہ ہے کہ یہ بادل وہ طوفان شروع کریں گے جنہوں نے طبیعیات کو ہمیشہ کے لئے بدل دیا۔

نیوٹن کی کامیابی اور عطارد کا پہیلیون

نیوٹن کے حرکت اور عالمی کشش ثقل کے قوانین حیرت انگیز طور پر طاقتور تھے۔ انہوں نے ایک سیب کے گرنے اور چاند کی مدار کو ایک ہی فارمولے سے سمجھایا۔ انہوں نے ہیلی کے دم دار ستارے کی واپسی کی پیش گوئی کی، سیاروں کی نیویگیشن کی رہنمائی کی اور سائنسدانوں کی نسلوں کو متاثر کیا۔

لیکن سب کچھ بالکل فٹ نہیں تھا۔ عطارد کی مدار، جو سورج کے سب سے قریب سیارہ ہے، میں پیش قدمی دیکھی گئی - اس کا سورج کے قریب ترین نقطہ ہر چکر میں تھوڑا سا تبدیل ہوتا تھا۔ اس کا بیشتر حصہ نیوٹن کی میکینکس اور دیگر سیاروں کی کشش ثقل سے سمجھایا جا سکتا تھا۔ تاہم، فی صدی 43 آرک سیکنڈ کی ایک اضافی، ناقابل وضاحت وجہ باقی رہی۔ کچھ نے اسے سمجھانے کے لئے ایک غیر مرئی سیارہ، "وولکن" تجویز کیا۔ لیکن دوربینوں نے کبھی ایسی کوئی دنیا نہیں پائی۔

یہ چھوٹی سی بے ضابطگی کو نظر انداز کرنا آسان تھا، لیکن یہ کیلون کے بادلوں میں سے ایک تھی جو چھپ کر رہی: ایک چھوٹی سی بے ضابطگی جو نیوٹن کے فوری، مطلق کشش ثقل کے تصور میں گہری خامی کی طرف اشارہ کرتی تھی - ایک خمیدہ خلائی وقت کی ابتدائی سرگوشی۔

بلیک باڈی کی تباہی

لرمی اور روشنی کی دنیا میں ایک اور بادل بن رہا تھا۔ ایک بلیک باڈی - ایک مثالی چیز جو تمام ترتابکاری کو جذب کرتی ہے اور دوبارہ خارج کرتی ہے - اپنی درجہ حرارت کے لحاظ سے ایک مخصوص سپیکٹرم کے ساتھ چمکتی ہے۔ کلاسیکی طبیعیات نے پیش لوئی کی تھی کہ بلند تعدد پر، خارج ہونے والی تابکاری بغیر کسی حد کے بڑھ جائے گی، جسے نام نہاد "الٹراوائلٹ تباہی" کہا گیا۔ دوسرے لفظوں میں، ایک گرم تنور کو الٹراوائلٹ روشنی میں لامحدود توانائی کے ساتھ چمکنا چاہیئے - واضح طور پر مضحکہ خیز۔

تجربات نے دکھایا کہ اصلی بلیک باڈیز محدود، اچھی طرح سے متعین سپیکٹرم خارج کرتی ہیں۔یہاں کلاسیکی طبیعیات کی ناکامی واضح تھی، اور اسے نئے اصولوں کے بغیر درست نہیں کیا جا سکتا تھا۔

1900 میں میکس پلانک نے ہچکچاہٹ کے ساتھ ایک جرأت مندانہ حل پیش کیا: توانائی مسلسل نہیں ہے، بلکہ یہ الگ الگ پیکٹوں میں آتی ہے - کوانٹا۔ اس نے بعد میں غور کیا: "**مجھے ایک قسم کی مایوسی کا سہارا لینا پڑا، ایک مایوس کن عمل۔**" یہ بنیادی خیال کوانٹم تھیوری کا جنم تھا، حالانکہ خود پلانک نے اسے ایک چال کے طور پر دیکھا، ابھی تک ایک انقلاب نہیں۔ ایک اور بادل تاریک ہو گیا، پھٹنے کے انتظار میں۔

فوٹو الیکٹرک اثر

1905 میں، البرٹ آئن سٹائن نے کلاسیکی طبیعیات پر کوانٹم حملے کو اور گہرا کیا۔ روشنی، جو طویل عرصے سے ایک لہر کے طور پر سمجھی جاتی تھی، ایک ذرہ کے طور پر بھی برتاؤ کر سکتی تھی۔ فوٹو الیکٹرک اثر میں، دھات پر روشنی ڈالنے سے الیکٹران خارج ہوتے ہیں۔ کلاسیکی تھیوری نے کہا کہ خارج ہونے والے الیکٹرانوں کی توانائی روشنی کی شدت پر منحصر ہوگی۔ اس کے بجائے، تجربات نے دکھایا کہ یہ تعدد پر منحصر ہے۔ صرف ایک حد سے زیادہ تعدد والی روشنی - چاہے کتنی ہی چمکدار ہو - الیکٹرانوں کو آزاد لر سکتی تھی۔

آئن سٹائن نے اس کی وضاحت یہ تجویز کر کے کی کہ روشنی توانائی کے پیکٹوں میں آتی ہے، جنہیں بعد میں فوٹون کہا گیا۔ اس نے لکھا: "**ایسا لگتا ہے کہ روشنی کے کوانٹا کو لفظی طور پر لینا چاہیئے۔**"

یہ روشنی کی ذراتی نقطہ نظر کی طرف ایک چونکا دینے والی واپسی تھی، اور اس نے اسے نوبل انعام دلایا۔ اس سے بھی اہم بات یہ تھی کہ اس نے دکھایا کہ لہر-ذرہ دوگانگی ایک تجسس نہیں تھی، بلکہ ایک بنیادی اصول تھا۔ ایک اور بادل بجلی کی طرح چمکا۔

ایٹم اور ردرفورڈ کا حیرت انگیز تجربہ

بیسویں صدی کے آغاز میں، ایٹموں کو حقیقی تسلیم کیا گیا تھا، لیکن ان کی ساخت ایک راز تھی۔ جے جے تھامسن کے "پلوم پڈنگ ماڈل" نے الیکٹرانوں کو ایک منتشر مثبت چارج میں جڑا ہوا تصور کیا۔ لیکن 1911 میں، ارنسٹ ردرفورڈ کے سونے کی ورق کے تجربے نے اس تصویر کو توڑ دیا۔ پتلی سونے کی ورق پر الفا ذرات فائر کرکے، اس نے پایا کہ زیادہ تر سیدھے گزر گئے، لیکن کچھ تیز زاویوں پر بکھر گئے۔ **"جیسے کہ آپ نے 15 انچ کا گولہ ٹشو پیپر پر فائر کیا ہو اور وہ واپس آگیا،"** ردرفورڈ نے تبصرہ کیا۔

نتیجہ: ایٹموں میں ایک چھوٹا، گھنا نیوکلیئس ہوتا ہے جو زیادہ تر خالی جگہ سے گھرا ہوتا ہے۔ لیکن مدار میں گھومنے والے الیکٹران نیوکلیئس کی طرف کیوں نہیں گھومتے، اپنی توانائی کو تابکار کرتے ہوئے؟ کلاسیکی برقی حرکیات کا کوئی جواب نہیں تھا۔ ایٹم کی استحکام ایک راز تھی - کیلون کا ایک اور بادل جو طوفان میں پھول رہا تھا۔

دو بادل طوفان بن گئے

1910 تک، دراڑیں اتنی بڑی تھیں کہ انہیں نظر انداز نہیں کیا جا سکتا تھا۔ کلاسیکی طبیعیات درج ذیل کو سمجھا نہیں سکتی تھی:

- عطارد کی مدار۔
- بلیک باڈی کی تابکاری۔
- فوٹو الیکٹرک اثر۔
- ایٹموں کی استحکام۔

جو معمولی بے ضابطگیاں دکھائی دیتی تھیں، وہ گہری ناکامیوں کی علامات تھیں۔ دو دہائیوں کے اندر، انہوں نے دو انقلابات کو جنم دیا: **عمومی نظریہ اضافیت** کشش ثقل اور خلائی وقت کی جیومیٹری کو سمجھانے کے لئے، اور **کوانٹم میکینکس** مائیکروسکوپک دنیا کو سمجھانے کے لئے۔

طبیعیات بالکل ختم نہیں ہوئی تھی۔ یہ تو بس حقیقت کی عجیب، پرت دار ساخت کو کھولنا شروع کر رہی تھی۔

کوانٹم میکینکس کی پیدائش

بیسویں صدی کے آغاز میں، کلاسیکی طبیعیات کی دراڑیں کھلے ہوئے گڑھوں میں تبدیل ہو گئی تھیں۔ بلیک باڈی کی تابکاری، فوٹو الیکٹرک اثر، ایٹمی ساخت - ان میں سے کوئی بھی نیوٹن کی میکینکس یا میکسویل کے برقی مقناطیسیت سے سمجھا نہیں جا سکتا تھا۔ طبیعیات دانوں کو تیزی سے جرأت مندانہ خیالات کی ایک سیریز اپنانے پر مجبور کیا گیا۔ جو ابھرا وہ ایک معمولی اصلاح نہیں تھی، بلکہ حقیقت کی مکمل دوبارہ ایجاد تھی: **کوانٹم میکینکس۔**

پلانک کے کوانٹا: ہچکچاہٹ والی انقلاب

1900 میں، میکس پلانک نے بلیک باڈی کے مسئلے کو حل کرنے کی کوشش کی۔ کلاسیکی طبیعیات نے بلند تعدد پر لامحدود تابکاری کی پیش گوئی کی - "الٹراوائلٹ تباہی"۔ مایوسی میں، پلانک نے ایک جرأت مندانہ ریاضیاتی چال متعارف کروائی: فرض کریں کہ توانائی مسلسل نہیں ہے، بلکہ یہ الگ الگ پیکٹوں میں خارج ہوتی ہے، جو تعدد کے متناسب ہے:

$$E = h\nu$$

سادہ زبان میں وضاحت: ایک روشنی کی شعاع جس کی تعدد ν ہوتی ہے، صرف $h\nu$ کے سائز کے ٹکڑوں میں توانائی کا تبادلہ کر سکتی ہے؛ زیادہ تعدد والی روشنی توانائی کے بڑے "ٹکڑوں" کو لے جاتی ہے۔

خود پلانک نے اسے ایک عملی حل کے طور پر دیکھا، نہ کہ ایک بنیادی تبدیلی۔ لیکن یہ تسلسل کی دیوار میں پہلی دراڑ تھی جس نے صدیوں تک طبیعیات کو متعین کیا تھا۔

آئن سٹائن کے روشنی کے کوانٹا

پانچ سال بعد، آئن سٹائن نے پلانک کے خیال کو سنجیدگی سے لیا۔ فوٹو الیکٹرک اثر کو سمجھانے کے لئے، اس نے تجویز پیش کی کہ روشنی خود کوانٹوں سے بنی ہے - جنہیں بعد میں فوٹون کہا گیا۔

یہ چونکا دینے والا تھا۔ یانگ کے ڈبل سلاٹ تجربے کے ایک صدی بعد سے روشنی کو ایک لہر کے طور پر سمجھا جاتا تھا۔ لیکن آئن سٹائن نے دکھایا کہ یہ ایک ذرہ کے طور پر بھی برتاؤ کر سکتی ہے۔ لہر-ذرہ دوگانگی پیدا ہوئی۔

فوٹو الیکٹرک اثر نے آئن سٹائن کو 1921 میں نوبل انعام دلایا اور کوانٹم نقطہ نظر کی پہلی فیصلہ کن فتح کو نشان زد کیا - ایک اور بادل جو طوفان میں تبدیل ہو گیا۔

بوہر کا ایٹم

ایٹم کی ساخت ایک معمہ بنی رہی۔ ردرفورڈ نے دکھایا تھا کہ نیوکلیئس موجود ہے، لیکن مدار میں گھومنے والے الیکٹران اندر کی طرف کیوں نہیں گھومتے؟

1913 میں، نیلس بوہر نے ایک جرأت مندانہ حل تجویز کیا: الیکٹران صرف کچھ مخصوص الگ الگ مداروں میں رہتے ہیں اور روشنی کے کوانٹا خارج یا جذب کرکے ان کے درمیان چھلانگ لگا سکتے ہیں۔ اس کا ماڈل ہائیڈروجن کی سپیکٹریل لائنوں کو حیرت انگیز درستگی کے ساتھ سمجھاتا تھا۔

بوہر کا ایٹم کلاسیکی مداروں اور کوانٹم قوانین کا ایک عجیب ملاپ تھا، لیکن یہ کام کرتا تھا۔ یہ ایک اشارہ تھا کہ کوانٹائزیشن صرف ایک چال نہیں تھی - یہ ایک بنیادی اصول تھا۔ بوہر نے مذاق کیا: **"جو کوئی کوانٹم تھیوری سے حیران نہیں ہوتا، وہ اسے سمجھ نہیں پایا۔"** بوہر کے لئے، حیرت اس بات کی علامت تھی کہ آپ توجہ دے رہے ہیں۔

ڈی بروگلی کی لہریں

1924 میں، لوئی ڈی بروگلی نے دوگانگی کو الٹ دیا۔ اگر روشنی کی لہریں ذرات کی طرح برتاؤ کر سکتی ہیں، تو شاید ذرات لہروں کی طرح برتاؤ کر سکتے ہیں۔ اس نے تجویز پیش کی کہ الیکٹرانوں کی لہر کی لمبائی ہوتی ہے، جو درج ذیل سے دی جاتی ہے:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

سادہ زبان میں وضاحت: زیادہ رفتار p والے ذرات کی لہر کی لمبائی چھوٹی ہوتی ہے؛ تیز، بھاری "گولیاں" سست، ہلکے ذرات سے کم لہری دکھائی دیتی ہیں۔

اس خیال کی تصدیق 1927 میں ہوئی جب ڈیویسن اور جرمر نے ایک کرسٹل سے الیکٹران کی تفریق دیکھی۔ مادہ لہری تھا۔ لہروں اور ذرات کے درمیان کی دیوار گر گئی۔

ہائزنبرگ کی میٹرکس میکینکس

1925 میں کام کرتے ہوئے، ورنر ہائزنبرگ نے ایک ہم آہنگ ڈھانچہ تلاش کیا جو مشاہداتی چیزوں پر قائم تھا - خارج ہونے والی تابکاری کی قابل پیمائش تعداد اور شدت - بغیر ان الیکٹران مداروں کی تصویر کشی کے جو دیکھے نہیں جا سکتے تھے۔ نتیجہ میٹرکس

میکینکس تھا: ایک نیا جبر جس میں ضرب کا ترتیب اہم ہوتا ہے $(AB \neq BA)$۔

یہ بنیادی ریاضیات الیکٹرانوں کے غیر تسلسل چھلانگوں کو پکڑتی تھی اور سپیکٹرم کی پیش گوئی حیرت انگیز درستگی کے ساتھ کرتی تھی۔ الجھن پیدا کرنے والی؟ ہاں۔ لیکن گہری پیش گوئی کرنے والی بھی۔

شروڈنگر کی لہری میکینکس

تقریباً ایک ہی وقت میں، ایروِن شروڈنگر نے ایک لہری مساوات تیار کی جو بیان کرتی ہے کہ مادہ کی لہریں وقت کے ساتھ کیسے تبدیل ہوتی ہیں:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi = \hat{H}\Psi$$

سادہ زبان میں وضاحت: لہری فنکشن Ψ ایک نظام کی امکانات کو کوڈ کرتا ہے، اور ہیملٹونیئن $\hat{H}$ بتاتا ہے کہ یہ امکانات وقت کے ساتھ کیسے بدلتے ہیں۔

شروڈنگر کا نقطہ نظر ہائزنبرگ کے میٹرکسز سے زیادہ بدیہی تھا اور جلد ہی کوانٹم میکینکس کی معیاری زبان بن گیا۔ ابتدا میں، شروڈنگر نے سوچا کہ الیکٹران واقعی منتشر لہریں ہیں، لیکن تجربات نے کچھ اور دکھایا۔ لہری فنکشن خلاء میں ایک طبیعی لہر نہیں تھی، بلکہ ایک احتمال کی شدت تھی - ایک نئی قسم کی حقیقت۔

ہائزنبرگ کا غیر یقینی اصول

1927 میں، ہائزنبرگ نے ایک چونکا دینے والا نتیجہ رسمی شکل دی: ایک ذرہ کی پوزیشن اور رفتار کو ایک ساتھ من مانی درستگی کے ساتھ نہیں جانا جا سکتا۔ یہ **غیر یقینی اصول** پیمائشی آلات کی حد نہیں تھا، بلکہ فطرت کی ایک بنیادی خاصیت تھی:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

سادہ زبان میں وضاحت: پوزیشن پر مضبوط گرفت رفتار پر ناگزیر طور پر ڈھیلی ہو جاتی ہے، اور اس کے برعکس؛ فطرت خود اس حد کو کھینچتی ہے۔

نیوٹن کی طبیعیات کا بنیادی ستون، یقینیت، امکانات کے لئے جگہ چھوڑ گیا۔

کوپن ہیگن کی تشریح

بوہر اور ہائزنبرگ نے ایک تشریح پیش کی: کوانٹم میکینکس متعین حقیقتوں کی وضاحت نہیں کرتی، بلکہ پیمائش کے نتائج کی امکانات لی وضاحت کرتی ہے۔پیمائش کا عمل لہری فنکشن کو منہدم کرتا ہے۔

یہ کوپن ہیگن تشریح عملی اور کامیاب تھی، حالانکہ فلسفیانہ طور پر پریشان کن تھی۔ آئن سٹائن نے مشہور طور پر اعتراض کیا - "خدا پاسوں سے نہیں کھیلتا" - لیکن تجربات کوانٹم میکینکس کی احتمالی فطرت کی تصدیق کرتے رہے۔

ڈیراک اور ریلاتیوِسٹک کوانٹم تھیوری

1928 میں، پال ڈیراک نے کوانٹم میکینکس کو خصوصی نظریہ اضافیت کے ساتھ ملایا، جس سے ڈیراک مساوات پیدا ہوئی۔ اس نے الیکٹران کو بے مثال درستگی کے ساتھ بیان کیا اور ایک نئے ذرہ کی پیش گوئی کی: پوزیٹرون، جو 1932 میں دریافت ہوا۔ ڈیراک کا پرسکون اعتماد - "**بنیادی طبیعیاتی قوانین جو طبیعیات کے ایک بڑے حصے اور تمام کیمیا کے ریاضیاتی نظریہ کے لئے ضروری ہیں مکمل طور پر معلوم ہیں**" - اس دور کی عزت نفس کو پکڑتا ہے۔

یہ پہلا اشارہ تھا کہ کوانٹم تھیوری کو نظریہ اضافیت کے ساتھ متحد کیا جا سکتا ہے - ایک وعدہ جو کوانٹم فیلڈ تھیوری میں بڑھے گا۔

ایک نئی عالمی نظریہ

1930 کی دہائی تک، کوانٹم انقلاب مکمل ہو چکا تھا:

- توانائی کوانٹمائزڈ تھی۔
- روشنی اور مادہ دونوں لہریں اور ذرات تھے۔
- ایٹم مستحکم تھا کیونکہ الیکٹران الگ الگ کوانٹم حالتوں پر قابض تھے۔
- احتمال، یقینیت نہیں، بنیادی پیمانوں پر راج کرتا تھا۔

کلاسیکی طبیعیات کو مسترد نہیں کیا گیا؛ اسے بڑے پیمانوں پر کوانٹم میکینکس کی حد کے طور پر دوبارہ حاصل کیا گیا۔ یہ جدید طبیعیات کا پہلا سبق تھا: پرانے نظریات کبھی "غلط" نہیں ہوتے، صرف نامکمل ہوتے ہیں۔

تاہم، کوانٹم میکینکس، جتنی بھی شاندار تھی، نئے چیلنجز کا سامنا کر رہی تھی۔ ذرات کیسے ایک دوسرے کے ساتھ تعامل کرتے ہیں، بکھرتے ہیں، تباہ ہوتے ہیں اور دوبارہ ابھرتے ہیں؟ ایک ایسا ڈھانچہ کیسے بنایا جائے جہاں ذرات کی تعداد مستقل نہ ہو اور نظریہ اضافیت کی ضروریات پوری ہوں؟

جواب بیسویں صدی کے وسط میں **کوانٹم فیلڈ تھیوری** کے ساتھ آیا، جس کی قیادت فائنمین اور دیگر نے کی - ہماری کہانی کا اگلا باب۔

رچرڈ فائنمین اور کوانٹم فیلڈ تھیوری کی زبان

کوانٹم میکینکس نے ایٹموں اور مالیکیولز کی وضاحت میں کامیابی حاصل کی تھی، لیکن جیسے جیسے تجربات گہرے ہوتے گئے، اس کی حدود واضح ہو گئیں۔ الیکٹران، فوٹون اور دیگر ذرات صرف بندھن حالتوں میں نہیں بیٹھے تھے - وہ ایک دوسرے کے ساتھ تعامل کرتے تھے، ٹکراتے تھے، تباہ ہوتے تھے اور نئے ذرات بناتے تھے۔ ان عمل کی وضاحت کے لئے، کوانٹم میکینکس کو آئن سٹائن کے خصوصی نظریہ اضافیت کے ساتھ ملانا پڑا۔ نتیجہ **کوانٹم فیلڈ تھیوری (QFT)** تھا، وہ ڈھانچہ جس پر تمام جدید ذراتی طبیعیات ٹکی ہوئی ہے۔

کوانٹم میکینکس کیوں کافی نہیں تھی

عام کوانٹم میکینکس ذرات کی تعداد کو مستقل سمجھتی تھی۔ ایک الیکٹران ایٹم میں حرکت کر سکتا تھا، لیکن یہ اچانک غائب یا بندیل نہیں ہو سکتا تھا۔ لیکن ذراتی ایکسلریٹرز میں تجربات نے بالکل یہی دکھایا: ذرات مسلسل بنتے اور تباہ ہوتے ہیں۔ اور نظریہ اضافیت کا $E = mc^2$ یہ تقاضا کرتا تھا کہ کافی توانائی والے تصادم توانائی کو نئی ماس میں تبدیل کر سکتے ہیں۔

QFT نے وجودیات کو بدل کر جواب دیا: **میدان بنیادی ہیں؛ ذرات ایکسائٹیشن ہیں۔** ہر ذرہ کی قسم ایک کوانٹم فیلڈ سے مطابقت رکھتی ہے جو پوری خلاء میں پھیلا ہوا ہے۔

- الیکٹران الیکٹران فیلڈ میں ایک لہر ہے۔
- فوٹون برقی مقناطیسی فیلڈ میں ایک لہر ہے۔
- گلوون، کوارک، W اور Z بوزون، اور ہگس - ہر ایک اپنے فیلڈ کی ایک ایکسائٹیشن ہے۔

تخلیق اور تباہی فطری ہو گئی: فیلڈ کو ایکسائٹ کریں یا اس کی ایکسائٹیشن کو ہٹائیں۔

کوانٹم الیکٹروڈائنامکس (QED)

پہلا مکمل طور پر کامیاب ریلاتیوِسٹک QFT **کوانٹم الیکٹروڈائنامکس (QED)** تھا، جو چارج شدہ مادہ (جیسے الیکٹران) اور فوٹونوں کے درمیان تعاملات کی وضاحت کرتا ہے۔ اسے 1940 کی دہائی میں رچرڈ فائنمین، جولین شونگر اور سن-ایٹرو ٹومونا گا نے تیار کیا - جنہوں نے 1965 میں نوبل انعام شیئر کیا - اور اس نے ابتدائی حسابات کے ایک مسئلے کو حل کیا: لامحدودیت۔

کلیدی چیز نارملائزیشن تھی، ایک اصولی طریقہ جس سے کچھ لامحدودیتوں کو چند قابل پیمائش پیرامیٹرز (چارج، ماس) میں جذب کیا جا سکتا تھا، جس سے محدود، درست پیش گوئیاں ممکن ہوئیں۔ نتیجہ تاریخی تھا: QED الیکٹران کے مقناطیسی لمحے کی پیش گوئی غیر معمولی درستگی کے ساتھ کرتی ہے - سائنس میں سب سے زیادہ درست تصدیق شدہ پیش گوئیوں میں سے ایک۔

فائنمین ڈایاگرام: طبیعیات کی ایک نئی گرامر

فائنمین کا سب سے زیادہ اثر انگیز تعاون تصوراتی تھا۔ اس نے ایک تصویری حساب اختراع کیا - **فائنمین ڈایاگرام** - جو مبہم انٹیگرلز کو بصری، قابل شمار عمل میں تبدیل کرتا تھا۔

- سیدھی لکیریں فرمیون (الیکٹران، کوارک) کی نمائندگی کرتی ہیں۔
- لہراتی لکیریں گیج بوزون (فوٹون، گلوون) کی نمائندگی کرتی ہیں۔
- ورٹیکس تعامل کے نقطے ہیں۔

ڈایاگرام ممکنہ "کہانیوں" کی فہرست بناتے ہیں جو ایک عمل میں حصہ ڈالتے ہیں، جو فائنمین کے پاتھ انٹیگرل نقطہ نظر کی بازگشت کرتا ہے: ایک کوانٹم عمل تمام راستوں کی تلاش کرتا ہے؛ ایام کے اضافہ ہوتے ہیں؛ احتمالات ان کی شدتوں کے مربع سے اخذ ہوتے ہیں۔ جو ممنوع تھا، وہ ٹھوس اور قابل حساب ہو گیا۔

QED سے آگے: مضبوط اور کمزور قوتوں کی طرف

QED نے برقی مقناطیسیت پر غلبہ حاصل کیا۔ لیکن وہی ٹول سیٹ - میدان، گیج سیمٹری، نارملائزیشن، ڈایاگرامیٹکس - آگے جا سکتا تھا۔

- **کمزور قوت:** بیٹا ڈیکے اور شمسی فیوژن کے لئے ذمہ دار، اسے بھاری ثالثوں ($Z^0, W^\pm$) اور توازن کی خلاف ورزی کی ضرورت تھی - عجیب و غریب خصوصیات جنہیں ایک متحد وضاحت کی ضرورت تھی۔

- **مضبوط قوت:** جو کوارکوں کو پروٹونوں اور نیوٹرانوں کے اندر رکھتی ہے، اس کا کردار بالکل مختلف تھا - قلیل فاصلے پر زبردست طاقت، لیکن طویل فاصلے پر تقریباً غیر مرئی۔

متحد کرنے والا موضوع **گیج سمیٹری** تھا: تقاضا کریں کہ مساوات مقامی تبدیلیوں کے تحت اپنی شکل برقرار رکھیں، اور ضروری گیج فیلڈز (فوٹون، گلوون، W/Z) اور تعامل ڈھانچے حیرت انگیز ناگزیرپن کے ساتھ ابھرتے ہیں۔

فتح اور حدود

صدی کے وسط تک، QFT ذراتی طبیعیات کی لنگوا فرانکا بن چکی تھی۔ اس نے ذیلی ایٹمی دنیا کو منظم کیا اور درست حسابات کو ممکن بنایا۔ لیکن کشش ثقل نے کوانٹائزیشن کا مقابلہ کیا - وہی نارملائزیشن چالیں ناکام ہو گئیں - اور خلائی وقت کی ایک مکمل کوانٹم تھیوری ناقابل رسائی رہی۔ QFT ایک شاندار، ڈومین سے محدود فتح تھی۔

کوانٹم کرومودائنامکس اور مضبوط قوت

QED کی کامیابی نے طبیعیات دانوں کو 1950 اور 1960 کی دہائیوں کی افراتفری کی سرحد سے نمٹنے کی ترغیب دی: "ذراتی چڑیا گھر" - نئے ہیڈرون - پایون، کیون، ہائپرون، ریزوننسز - ایکسلریٹرز سے حیران کن کثرت میں ابھرے۔ کیا یہ افراتفری بنیادی تھی، یا اسے کیمیائی جدول کی طرح منظم کیا جا سکتا تھا؟

مضبوط قوت کا معمہ

نیوکلیئر بانڈنگ نے عجیب خصوصیات دکھائیں:

- فیمٹومیٹر پیمانوں پر زبردست طاقت، جو اس سے آگے تیزی سے غائب ہو جاتی تھی۔
- سنترپتی: نیوکلیونز کو شامل کرنے سے فی ذرہ بانڈنگ رائختی طور پر نہیں بڑھتی تھی۔
- قلیل العمر ہیڈرونک ریزوننسز کی کثرت۔

کلاسیکی تمثیلیں ناکام ہو گئیں۔ ایک بالکل نئی تصویر کی ضرورت تھی۔

کوارک ماڈل

1964 میں، مرے جیل-مین اور آزادانہ طور پر جارج زویگ نے تجویز پیش کی کہ ہیڈرون زیادہ بنیادی اجزاء سے بنے ہیں: کوارک۔

- ابتدا میں: تین ذائقے - اپ، ڈاؤن، اسٹرینج - ہیڈرون ملٹی پلیٹس کو کیمیائی دورانی نمونوں کی طرح منظم کرتے تھے۔
- پروٹون اور نیوٹران: اپ/ڈاؤن کے امتزاج۔
- کیون اور ہائپرون: اسٹرینج کو شامل کرتے تھے۔

ماڈل نے چڑیا گھر کو منظم کیا۔ لیکن کسی بھی تجربے نے کبھی ایک واحد کوارک کو الگ نہیں کیا تھا۔ کیا کوارک "حقیقی" تھے، یا صرف ایک مفید حساب کتاب؟

قید کا راز

یہاں تک کہ جب پروٹون بلند توانائی پر ٹوٹے، ڈیٹیکٹرز نے ہیڈرونوں کی بارش دیکھی، نہ کہ آزاد کوارک۔ ایسا لگتا تھا کہ کوارکوں کو باندھنے والی قوت جتنا آپ انہیں الگ کرنے کی کوشش کرتے ہیں، اتنی ہی مضبوط ہو جاتی ہے - جیسے ربڑ کا بینڈ جو جتنا زیادہ کھینچا جاتا ہے، اتنا ہی سخت ہوتا ہے۔ ایک قوت برقی مقناطیسیت سے اتنا مختلف کیسے برتاؤ کر سکتی تھی؟

کوانٹم کروموڈائنامکس (QCD)

پیش رفت ایک نئی غیر ابیلین گیج تھیوری تھی: **کوانٹم کروموڈائنامکس (QCD)**۔

- کوارک **رنگین چارج** لے جاتے ہیں (ایک خلاصہ خاصیت جس میں تین قسمیں ہیں - سرخ، سبز، نیلا)۔
- ہیڈرون **رنگین** امتزاج ہیں (جیسے RGB سے "سفید روشنی")۔
- قوت **گلوونوں** کے ذریعے منتقل ہوتی ہے، جو خود رنگ لے جاتے ہیں - لہذا وہ ایک دوسرے کے ساتھ تعامل کرتے ہیں۔

یہ آخری خاصیت - خود سے تعامل کرنے والے گیج بوزون - نے QCD کو QED سے معیاری طور پر مختلف بنایا اور اس کی سب سے زیادہ حیران کن خصوصیات کو سہارا دیا۔

بے عیب آزادی اور قید

1973 میں، ڈیوڈ گراس، فرینک ولزیک اور ڈیوڈ پولیٹزر نے **بے عیب آزادی** دریافت کی:

- بہت قلیل فاصلوں پر (بلند توانائیاں)، **مضبوط جوڑ کم ہو جاتا ہے**؛ کوارک تقریباً آزادانہ طور پر برتاؤ کرتے ہیں۔
- بڑے فاصلوں پر (کم توانائیاں)، **جوڑ بڑھ جاتا ہے**؛ کوارک مضبوطی سے بندھے ہوتے ہیں - **قید**۔

سادہ زبان میں وضاحت: زیادہ توانائی کے ساتھ زوم کریں، اور کوارک رسی سے چھوٹ جاتے ہیں؛ دور جائیں، اور رسی مضبوطی سے کھینچتی ہے۔

اس نے SLAC کے گہرے غیر لچکدار بکھراؤ کے نتائج (پروٹونوں کے اندر نقطہ نما اجزاء) اور آزاد کوارکوں کی غیر موجودگی کو سمجھایا۔ اس تینوں نے 2004 میں نوبل انعام جیتا۔

QCD کے لئے ثبوت

QCD ایک خوبصورت خیال سے ایک تجرباتی بنیاد میں پختہ ہو گئی:

- **کولائیڈرز میں جیٹس**: بلند توانائی والے کوارک اور گلوون تصادم سے ابھرتے ہیں اور مرکز شدہ جیٹس میں "ہیڈرونائز" کرتے ہیں - جن کے نمونے QCD کی پیش گوئیوں سے مطابقت رکھتے ہیں۔
- **لیٹس QCD**: سپر کمپیوٹر سمولیشنز خلائی وقت کو الگ کرتی ہیں، ہیڈرون کی ماسز اور تعاملات کو متاثر کن درستگی کے ساتھ دوبارہ پیدا کرتی ہیں۔
- **کوارک-گلوون پلازما**: انتہائی درجہ حرارت اور کثافت پر (RHIC, LHC)، مادہ کوارکوں اور گلوونوں کی غیر مقید حالت میں منتقل ہوتا ہے - ابتدائی کائنات کی بازگشت۔

ہیڈرون مرکب بن گئے، بنیادی نہیں؛ گلوونوں نے چپکنے کا کام کیا۔

ایک دو دھاری فتح

QED اور الیکٹروویک تھیوری کے ساتھ مل کر QCD نے **معیاری ماڈل (SM)** کو مکمل کیا۔ یہ ایک شاندار کامیابی تھی، لیکن اس نے نئے معموں کو اجاگر کیا:

- قید ابھی تک پہلے اصولوں سے تجزیاتی طور پر ثابت نہیں ہوئی (حالانکہ یہ زبردست طور پر سہارا دیا گیا ہے)۔
- **مضبوط CP مسئلہ**: QCD ایک CP کی خلاف ورزی کی اجازت دیتی دکھائی دیتی ہے جو تجربات میں نظر نہیں آتی۔
- **کائناتی خلا**: QCD عام مادہ کی وضاحت کرتی ہے، تاریک مادہ کی نہیں۔

تھیوری نے بہت کچھ سمجھایا - لیکن سب کچھ نہیں۔

الیکٹرو ویک اتحاد اور ہگس میکانزم

1970 کی دہائی کے اوائل میں، QED اور QCD ٹھوس زمین پر تھے۔ لیکن **کمزور نیوکلیئر قوت** - تابکار ڈیکے اور ستاروں کے فیوژن کے لئے ذمہ دار - عجیب رہی: قلیل دوری، توازن کی خلاف ورزی، بھاری بوزونوں کے ذریعے منتقل۔

ایک گہری وحدت افق پر ابھر رہی تھی۔ یہ **الیکٹرو ویک تھیوری** کے طور پر آئی، جو طبیعیات کی سب سے بڑی کامیابیوں میں سے ایک ہے۔ اس کی مرکزی پیش گوئی - **ہگس بوزون** - کی تصدیق میں تقریباً نصف صدی لگ گئی۔

کمزور قوت: ایک عجیب تعامل

کمزور قوت درج ذیل میں ظاہر ہوتی ہے:

- **بیٹا ڈیکے:** ایک نیوٹران پروٹون میں تبدیل ہوتا ہے، ایک الیکٹران اور ایک اینٹی نیوٹرینو خارج کرتا ہے۔
- **ستاروں کا فیوژن:** پروٹون نیوٹرانوں میں تبدیل ہوتے ہیں تاکہ بھاری نیوکلئی بن سکیں۔

ممیز خصوصیات:

- یہ بہت چھوٹے فاصلوں پر کام کرتی ہے (~10^{-3} فیمٹو میٹر)۔
- توازن (آئینہ سمیٹری) اور یہاں تک کہ CP سمیٹری کی خلاف ورزی کرتی ہے۔
- تین بھاری ذرات کے ذریعے منتقل ہوتی ہے: W^+, W^-, Z^0۔

ان بوزونوں کی ماس کہاں سے آتی ہے، جبکہ فوٹون بغیر ماس کے رہتا ہے؟ یہ ایک مرکزی معمہ تھا۔

الیکٹرو ویک اتحاد: گلاشو، سلام، وینبرگ

1960 کی دہائی میں، شیلڈن گلاشو، عبدالسلام اور اسٹیون وینبرگ نے ایک اتحاد تجویز کیا: برقی مقناطیسیت اور کمزور قوت ایک ہی الیکٹرو ویک تعامل کے دو چہرے ہیں۔

اہم خیالات:

- بلند توانائیوں پر، دونوں مل جاتے ہیں؛ کم توانائیوں پر، وہ مختلف دکھائی دیتے ہیں۔
- ایک نیا فیلڈ جو خلاء کو بھرتا ہے - **ہگس فیلڈ** - سیمیٹری توڑتا ہے، W اور Z کو ماس دیتا ہے جبکہ فوٹون کو بغیر ماس کے چھوڑتا ہے۔
- ریاضیاتی طور پر: ایک گیج تھیوری جس کا سیمیٹری گروپ $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ہے۔

ہگس میکانزم

ہگس فیلڈ ایک کائناتی میڈیم کی طرح ہے جو پوری خلاء کو بھرتا ہے۔ جو ذرات اس کے ساتھ تعامل کرتے ہیں وہ جڑتی ماس حاصل کرتے ہیں؛ جو نہیں کرتے (جیسے فوٹون) وہ بغیر ماس کے رہتے ہیں۔

- W اور Z بوزون ہگس فیلڈ کے ساتھ مضبوطی سے جوڑتے ہیں، تقریباً 80–90 GeV کی ماس حاصل کرتے ہیں۔
- فرمیون یوکاوا جوڑ کے ذریعے ماس حاصل کرتے ہیں - شدت جو ہر فرمیون قسم کے لئے مختلف ہوتی ہے۔
- خود ہگس بوزون ہگس فیلڈ کی ایک لہر (کوانٹم ایکسائٹیشن) ہے۔

سادہ زبان میں وضاحت: ماس ایک "مادہ" نہیں ہے جو ایک بار دیا جاتا ہے، بلکہ ایک ہمیشہ موجود فیلڈ کے ساتھ مسلسل تعامل ہے۔

تجرباتی فتح: W, Z اور ہگس

ہمت والے تجربات نے تھیوری کی جانچ کی:

- **1983 (CERN, SPS)**: $W^{\pm}$ اور Z^0 بوزونوں کی دریافت، جن کی ماسز اور خصوصیات پیش گوئیوں سے مطابقت رکھتی تھیں۔ کارلو روبیا اور سائمن وین ڈر میر نے 1984 میں نوبل انعام جیتا۔
- **2012 (CERN, LHC)**: ATLAS اور CMS نے ~125 GeV پر ایک نئے ذرہ کا اعلان کیا - **ہگس بوزون** - جس کے پیداوار اور ڈیکے چینلز معیاری ماڈل کی توقعات کے مطابق تھے۔

دریافت نے معیاری ماڈل کی ذرات کی فہرست کو مکمل کیا۔ طوفان گزر چکا تھا؛ نقشہ زمین سے مطابقت رکھتا تھا۔

معیاری ماڈل اپنی مکمل شکل میں

2010 کی دہائی تک، معیاری ماڈل سائنس کی سب سے کامیاب تھیوریوں میں سے ایک کے طور پر کھڑا تھا:

- **قوتیں (میدان):**
  - برقی مقناطیسیت (QED)
  - مضبوط قوت (QCD)
  - کمزور قوت (الیکٹرو ویک کا حصہ)

- **ذرات:**
  - چھ کوارک (اپ، ڈاؤن، اسٹرینج، چارم، باٹم، ٹاپ)۔
  - چھ لیپٹون (الیکٹران، میوون، ٹاؤ اور ان کے نیوٹرینو)۔
  - گیج بوزون (فوٹون، آٹھ گلوون، W, Z)۔
  - ہگس بوزون۔

اس کی پیش گوئی کی طاقت حیرت انگیز تھی، جو کئی نسلوں کے کولائیڈرز اور ڈیٹیکٹرز کے ذریعے تصدیق شدہ تھی۔

دراڑیں ابھریں

یہاں تک کہ جب 2012 میں شیمپین کی بوتلیں کھولی گئیں، طبیعیات دانوں کو معلوم تھا کہ معیاری ماڈل نامکمل ہے۔

- **اس میں کشش ثقل شامل نہیں ہے۔**
- **نیوٹرینو کی ماس ہوتی ہے، لیکن کم سے کم معیاری ماڈل انہیں بغیر ماس کے بناتا ہے۔**
- **تاریک مادہ اور تاریک توانائی غائب ہیں۔**
- **ہائرارکی مسئلہ:** ہگس کی ماس پلانک پیمانے پر کوانٹم اصلاحات کے مقابلے میں اتنی ہلکی کیوں ہے؟
- **ذائقہ کے معمے:** یہ ماسز اور ملاوٹ کیوں؟ تین نسلیں کیوں؟

ہگس کی دریافت ایک اختتام نہیں تھی، بلکہ ایک آغاز تھی - ایک اشارہ کہ معیاری ماڈل جہاں تک جاتا ہے درست ہے۔

سائنسی طریقہ کار میں ایک سبق

کیلون کے عاجزانہ "بادلوں" سے لے کر مکمل انقلابات تک، طبیعیات نے بے ضابطگیوں کو سنجیدگی سے لے کر ترقی کی:

1. **حیران کن ڈیٹا** (عطارد کی پیش قدمی، بلیک باڈی سپیکٹرم، فوٹو الیکٹرک حد، ایٹمی استحکام)۔
2. **جرأت مندانہ نظریاتی ڈھانچے** (عمومی نظریہ اضافیت؛ کوانٹم میکینکس)۔
3. **متحد کرنے والے فارمولزم** (کوانٹم فیلڈ تھیوری؛ گیج سمیٹری)۔
4. **پیش گوئی شدہ ہستیں** (کوارک، گلوون، W/Z، ہگس)۔
5. **تجرباتی استقامت کے دہائیوں** (ٹیبل ٹاپ سے ٹیرا الیکٹران وولٹ کولائیڈرز تک)۔
6. **فتح - اور نئے سوالات۔**

پرانے نظریات کو مسترد نہیں کیا گیا؛ انہیں حد کے معاملات کے طور پر **گھونسلا بنایا گیا**: نیوٹن آئن سٹائن کے اندر کم رفتار اور کمزور کشش ثقل میں، کلاسیکی کوانٹم کے اندر بڑے پیمانوں پر، غیر ریلاتیوِسٹک کوانٹم QFT کے اندر مستقل ذرات کی تعداد کے ساتھ۔

آخری غور

نیوٹن کے گھڑی جیسے کائنات سے پلانک کے مایوس کن کوانٹوں تک؛ آئن سٹائن کے فوٹونوں سے بوہر کے کوانٹم چھلانگوں تک؛ فائنمین کے ڈایاگرام سے QCD کے جیٹس اور ہگس فیلڈ کی خاموش ہر جگہ موجودگی تک - گزشتہ 150 سال چھوٹے بادلوں سے پیدا ہونے والے طوفان دکھاتے ہیں۔ ہر بے ضابطگی - عطارد کی مدار، بلیک باڈی سپیکٹرم، غیر مستحکم ایٹم، غائب ہگس - ایک اشارہ تھا کہ کچھ گہرا دریافت ہونے کا منتظر تھا۔

آج، معیاری ماڈل ایک فتح کے طور پر کھڑا ہے، اس کی پیش گوئیاں شاندار درستگی کے ساتھ تصدیق شدہ ہیں۔ تاہم، کیلون کے بادلوں کی طرح، نئے اسرار چھپے ہوئے ہیں: **تاریک مادہ، تاریک توانائی، نیوٹرینو کی ماسز، بیریون عدم توازن، کوانٹم کشش ثقل**۔ اگر تاریخ ایک رہنما ہے، تو یہ دراڑیں یہ نہیں بتائیں گی کہ طبیعیات ختم ہو گئی ہے - وہ یہ بتائیں گی کہ یہ ایک اور انقلاب شروع کر رہی ہے۔

حوالہ جات اور مزید پڑھائی

معیاری ماڈل اور کوانٹم فیلڈ تھیوری کے بنیادی اصول

- پیسکن، ایم ای، اور شروڈر، ڈی وی (1995)۔ **کوانٹم فیلڈ تھیوری کا تعارف**۔ ویسٹ ویو پریس۔
- وینبرگ، ایس (1995)۔ **میدانوں کا کوانٹم تھیوری** (جلد 1-3)۔ کیمبرج یونیورسٹی پریس۔
- گریفتھس، ڈی (2008)۔ **ابتدائی ذرات کا تعارف** (دوسرا ایڈیشن)۔ ویلی-وی سی ایچ۔
- فائنمین، آرپی، لیٹن، آربی، اور سینڈز، ایم (1963)۔ **فائنمین لیکچرز آن فزکس**۔ ایڈیسن-ویزلی۔

عمومی نظریہ اضافیت اور کاسمولوجی

- آئن سٹائن، اے (1916)۔ "عمومی نظریہ اضافیت کی بنیاد۔" **اینالن ڈیر فزیک**۔
- مسنر، سی ڈبلیو، تھورن، کے ایس، اور وہیلر، جے اے (1973)۔ **کشش ثقل**۔ ڈبلیو ایچ فریمین۔
- کیرول، ایس ایم (2004)۔ **خلائی وقت اور جیومیٹری: عمومی نظریہ اضافیت کا تعارف**۔ ایڈیسن-ویزلی۔