

物理こぼれ話 (1)

KENZOU

2016.3.07

- コニー：さん，こんにちわ。ご無沙汰してます。きょうは「物理こぼれ話」と題している面白いお話を聞かせてもらえるといいことできました。
- K 氏：やあ～コニー，久しぶりだね。元気そうでなによりだ。まあ，面白いお話といってもどうなるかわからないけど，ある機会にちょっとまとめた小話が元ネタなんだけど，それをもう少し中身を詰めて少し専門的な話も含めてお話ししようかというものなんだ。
- コニー：楽しみね。前置きはそれくらいにさせていただいて早速はじめていただけるかしら。
- K 氏：了解。いろいろなお話が出てくるけど，それぞれのお話の内容は全然関連性がないからそのつもりで聞いてね。
- コニー：わかったわ。

第 1 話.

自然界には 4 つの力がある

万有引力とクーロン力

19 世紀までは万有引力で代表される「重力」とクーロン力で代表される「電磁気力」の 2 つの力しか知られていなかった。よくご存じのように，この 2 つの力を表す式は逆二乗の式といってまったく同じ形をしている。しかし，万有引力は質量が m_1, m_2 の 2 つの物体に働く引力だけの力だが，クーロン力は 2 つの電荷 q_1, q_2 が同符号なら斥力（反発力），異符号なら引力となるということで，2 の力には決定的な違いがあるんだね。

$$\text{万有引力} \quad F_N = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (\text{引力だけ})$$

$$\text{クーロン力} \quad F_C = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (\text{引力と斥力})$$

ちなみに 2 つの力の大きさを比較してみよう。例えば水素原子の電子と原子核の陽子は $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$ 離れていて，2 つの粒子間に働く万有引力 F_N とクーロン力 F_C の大きさはそれぞれ

$$F_N = 3.7 \times 10^{-47} \text{ [N]}$$

$$F_C = 8.2 \times 10^{-12} \text{ [N]}$$

となり、2つの力の大きさは格段の隔たりがある。ちなみに、[N]はニュートンという力の単位で、1ニュートンは、1キログラムの質量をもつ物体に1メートル毎秒毎秒 (m/s^2) の加速度を生じさせる力だったね。

強い力

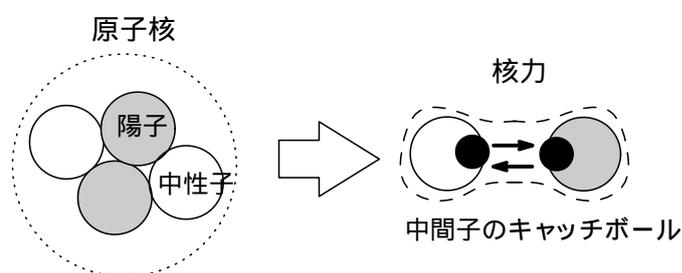
さて、20世紀に入りミクロの世界を記述する量子力学が確立され、素粒子の研究が急速に進むと、素粒子の世界には「強い力」と「弱い力」という2つの力が存在することが分かった。

- コニー：「強い力」とか「弱い力」というのは万有引力やクーロン力とは毛色の違う力なの？
- K氏：そうなんだ。我々が住んでいるマクロの世界ではお目にかからない力なんだ。そのあたりのことを次に話そうと思う。

例えば多数の陽子と電荷をもたない中性子が大体 $10^{-15}m$ という非常に狭い領域に詰まっている原子核を考えよう。陽子は正の電荷をもつので先ほどのクーロン力により互いに反発し合っただけでバラバラになるはずだね。とてもじゃないが一塊にまとまるはずがない。しかし、現実の原子核はバラバラはならず存在している！この不思議！？

この強烈な謎を解き明かしたのが、若干27歳の湯川博士が1934年に発表した中間子論¹なんだ。そのエッセンスは、「正電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子を原子核内に束縛しているのは、陽子と中性子が未知の粒子を交換することで『強い力』が生じている」というものだ。

強い力を核力といい、未知の粒子の予想質量が電子と核子²の間にあたる（湯川博士は中間子の質量は電子の質量の約200倍と推定された）ことから中間子と名付けられた。強い力といわれるように、核力の大きさは重力のザット 10^{38} 倍程度と大きい。しかし、核力の及ぶ範囲は、 $10^{-15}m$ （1千兆分の1m）と非常に短く、それ以上に離れると急激に弱くなってほとんど0になる³。 $10^{-15}m$ は1[fm]（フェムトメートル）という単位で、いまではほとんど使われないが1[Y]（yukawa）という単位でもある。



しかし、核力の及ぶ範囲は、 $10^{-15}m$ （1千兆分の1m）と非常に短く、それ以上に離れると急激に弱くなってほとんど0になる³。 $10^{-15}m$ は1[fm]（フェムトメートル）という単位で、いまではほとんど使われないが1[Y]（yukawa）という単位でもある。

- コニー：劇的なお話ね。湯川博士はその功績で1949年にノーベル賞を受賞されたのね。陽子と中性子の間で中間子を“キャッチボール”することで原子核はバラバラにならず

¹「素粒子の相互作用について..」と題して1934年11月末に送られ翌年2月の数物英文誌に掲載された。H.Yukawa: Proc. Phys. Math. Soc. Japan 17 (1935) 48.

²陽子と中性子の総称

³核力の到達距離は力を媒介する粒子の質量に反比例する。

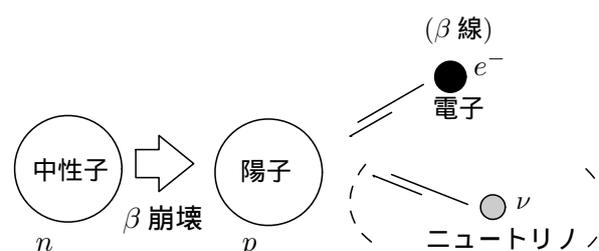
にまとまっていられるということね。。しかし、素人の私にはキャッチボールによって引っ張り合う力が生まれてくるというのはちょっとイメージしにくいわね。

- K氏：たしかにそうだね。道端でキャッチボールしていても2人が近づきあっていくということはないよね。「ミクロな素粒子の世界ではマクロな世界の常識は通用しないんだ！」とってしまっは身もふた蓋もない(笑い)。お互いに力を作用し合うのを相互作用というけど、相互作用が小さい場合、摂動法という近似計算で粒子の振る舞いを調べていく。逐次近似していくのだけど、その計算の過程から言えることは、あたかも”粒子が交換することで力が生まれる”というモデルで解釈できるということだ。これは摂動法という計算方法から言えることで、自然の振る舞いが本当にそうなのかは別だけど。電荷 q_1 と q_2 の間に働くクーロン力は光子のキャッチボールで生じ、重力も重力子(グラビトン)のキャッチボールによるとされている。このあたりの話に深い入りすると専門的になりすぎるので、軽くスルーしてそういうものだとして素直にとっておけばいいのではないかな。
- コニー：あまり歯切れのよくない説明だけど、そういうことなんだと了解しておくわ。
- K氏：もし、このあたりに興味あるんだったら、吉田伸夫(著)「素粒子論はなぜわかりにくいのか」科学技術評論社、2014を一読されることを薦めておくよ。

弱い力

ある種の原子核(ウランU, トリウムTh, ラジウムRa, ポロニウムPoなど)は自発的に強い放射線(α 線, β 線, γ 線)を放出して別の原子核に崩壊する。 α 線を放出して原子核が崩壊するアルファ崩壊は、1928年にガモフにより量子力学のトンネル効果と考えて説明された。要約すると、トンネル効果によりアルファ粒子が核力エネルギーの壁を通り抜け、原子核から外へ浸みだす。原子核の外へでたなら核力の影響が及ばないし、原子核とアルファ粒子の間には電磁気力による斥力が働くので、アルファ粒子は高速で原子の外へ飛びだしてということだね。

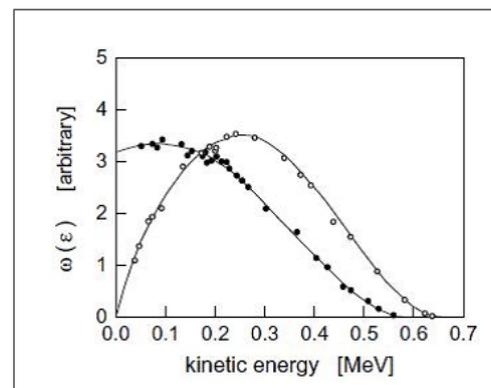
一方、ベータ崩壊は原子核から電子が放出されて、原子番号⁴が一つ多い原子の原子核に変わる現象(中性子が陽子と電子に崩壊)だが、いろいろ奇妙なことに多くの物理学者が悩まされた。アルファ崩壊やガンマ崩壊で



は放射線のエネルギー分布は原子核崩壊前後の原子核が持つエネルギーの差と等しい線スペクトルとなり、崩壊前後でエネルギー保存則が成り立っていることが分かる。

⁴原子核の中の陽子の数

しかし、ベータ崩壊では β 線のエネルギー分布は連続的となり（右図参照）、放出された電子のエネルギーを測定すると、中性子の質量（ m_n ）から陽子の質量（ m_p ）と電子の質量（ m_e ）の和を差し引いたものより小さいことが分かり、これは一体どういうことだと大問題になった。ベータ崩壊を引き起こす力は何だ、いままで知られている相互作用とは異なる新しい相互作用が働いているのではないかと考えられたが、しばらく暗中模索の状態が続いた。



- コニー： $E = mc^2$ で質量とエネルギーは等価ね。ベータ崩壊では

$$m_n = m_p + m_e + \frac{1}{2}m_e v^2$$

が成り立たず、

$$m_n > m_p + m_e + \frac{1}{2}m_e v^2$$

ということは、エネルギー保存則が破られているということ？

- K氏：そう思うよね。量子力学の大御所ボーアも放射性崩壊ではエネルギー保存の法則は破れていると考えたほどだ。多くの物理学者が悩んでいる中で、パウリはドイツ・チュービンゲンの物理学会議に送った1930年12月4日付の書簡の中で、“ベータ崩壊では電荷をもたない中性の何かの粒子がエネルギーを持ち去っている”と考えればエネルギー保存則は破られない、というアイデアを述べている⁵。なにか不明の電荷をもたない粒子が持ち去るエネルギーは β 線の測定器にかからないので、ベータ崩壊の散的でない連続的なエネルギー分布の説明がつく。翌1931年の6月、アメリカ物理学会の招待講演でパウリはこのアイデアを報告したが、講演録の印刷は断っている。同年10月、ローマに出向いたパウリはフェルミと会い、そのアイデアを話した。フェルミは非常に強い興味を示し、そのアイデアに刺激されてベータ崩壊の研究を進め、1934年に有名なフェルミ理論を発表した⁶。ちなみに、ニュートリノは1956年アメリカの物理学者ライネスにより初めてその存在が発見されるんだね。

- コニー：そうなんだ。歴史を紐解くと面白いわね。

フェルミのベータ崩壊理論にてでくる相互作用力は電磁相互作用力に比べて3ケタほど小さいが、これが「弱い力」と呼ばれる所以だ。ちなみに、弱い相互作用を媒介する素粒子はウィークボソンとよばれ、1983年に欧州合同原子核研究所（CERN）が発見した。

⁵藤田純一（訳）「W・パウリ物理と認識」講談社、昭和50年

⁶E. Fermi, Z. Phys. 88 (1934) 161

以上、4つの力についてお話ししてきたが、いまのところ自然界はこの4種類の力で構成されていると考えられている⁷。それぞれの力には、その力を媒介する（伝える）粒子があるということだね。そのような粒子を専門的にはゲージ粒子と呼んでいる。4つの力を一つの力の理論に統合できないかという試みが現在進んでいて、ワインバーグとサラムは1967年に4つの力のうち「電磁気力」と「弱い力」を統一した「電弱統一理論（ワインバーグ＝サラム理論）」を発表し、その業績により1979年にノーベル物理学賞を受賞している。重力を除く3つの力を統一した理論を大統一理論、重力までも統一する理論を超弦理論と呼んでいるが、現在活発に研究がなされているという状況だ。

- コニー：なかなか興味深いお話、おもしろかったわ。簡単に整理してまとめていただける。
- K氏：そうだね、簡単にまとめると次のようになる。

力の種類	媒介粒子	力の相対的大きさ	作用する距離
強い力	中間子（グルオン）	1	10^{-15}m
電磁気力	光子（フォトン）	10^{-2}	無限大（強さは距離の2乗に反比例）
弱い力	ウィークボソン	10^{-5}	10^{-18}m
重力	重力子（グラビトン）	10^{-40}	無限大（強さは距離の2乗に反比例）

- コニー：楽しいお話、ありがとうございました。

第1話終わり

⁷第5の力というのも研究されているが、未だ確たる証拠は見つかっていない。