

## 上原和也氏による「巨大数仮説に対する Gamow の考え」 に対するコメント

日本原子力研究所東海研究所

岩本 昭

iwamoto@hadron01.tokai.jaeri.go.jp

本誌 (核データニュース No.79 (2004) p95) に上原和也さんによる「巨大数仮説に対する Gamow の考え」という一文が掲載されました。これは本誌 (No.69 (2001) p2) に掲載された深堀智生さんによる記事に対するコメントとして書かれたものですが、深堀さんとも相談の上、この関連の仕事を現在も続けている私が深堀さんに代わってお返事することとしました。

まず、深堀さんの文章に出てきた  $\alpha$  が微細構造定数であるかどうかの質問です。微細構造定数  $\alpha$  は  $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c)$  で定義され、これは電磁的相互作用 (電子と光子) の結合定数を表しその値は約  $1/137$  です。一方、陽子や中性子の間に働く強い相互作用に対して、同じように無次元化された結合定数 (クォークとグルオンの間の結合定数から決まる) を定義できてここではそれを  $\alpha_s$  と表します。その値としてはほぼ  $0.2$  程度であると考えられます。この様にこの2つの結合定数、 $\alpha$  と  $\alpha_s$  とはその物理的内容も値も全く違います。深堀さんの文章ではこの後者を  $\alpha$  という記号で表していますので、そこが上原さんの疑惑を招いたものと思います。

さて、上原さんが議論されているように、P.Dirac の巨大数仮説 [1] では電磁相互作用の強さと重力相互作用の強さのアンバランスを解決する試みとして、重力相互作用の強さ  $G$  が時間に反比例して弱くなる  $G = const \times 1/t$  可能性を議論しました。この可能性に関しては上原さんの議論の中に出てくる、E.Teller の反論 (太古には重力が現在よりも強かったため、太陽内部での熱核融合及び地球の公転半径が現在とは異なり、地球上での生物の存在と矛盾する) などがあり、これを受けて P.Dirac から 30 年後に、G.Gamow は重力が時間変化する代わりに微細構造定数が逆の時間変化をするという可能性  $\alpha = const \times t$  を議論しました [2]。この発想の転換は単純なもので誰でもが考えつきそうですが、何れにせよこれらに加えて、A.S.Eddington や後に出てくる F.Dyson からも含めた巨人達が取り組んだ問題として有名です。なお、単純な比例 ( $\alpha = const \times t$ )、反比例関係 ( $G = const \times 1/t$ ) の様な考えは、現在では直接観測から否定されています。例えば重力定数  $G$  に関しては、単純な反比例関係があるとすると、現在の時点で 1 年当たりの相対的变化量として次式が成り立ちます。

$$\frac{\dot{G}}{G} = -t_0^{-1} = -7.3 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}. \quad (1)$$

ここで  $\dot{G}$  は  $G$  の時間微分を表し、また  $t_0$  は現在の宇宙年齢で、一昨年宇宙マイクロ波背景放射観測衛星 WMAP で得られた測定値は  $137 \pm 2$  億年です。一方、1970 年代の終わりに行われた Viking 計画の中で火星に降りた無人探査機を用いた重力測定 [3] で、

$$\frac{\dot{G}}{G} = (0.2 \pm 0.4) \times 10^{-11} y^{-1}, \quad (2)$$

が得られており、式 (1) と比較すると 1 桁は小さくなっており、純粋な Dirac 流の考え方はこの様な直接測定によっても既に否定されています。ここで上原さんのコメント ( 深堀さんの Oklo に関する議論は Dirac の考え方を否定したのではなく Gamow の考え方を否定したのではないか? ) に立ち返ると、深堀さんの議論では強い相互作用の結合定数を議論しているので、直接的には Dirac を否定したものでなく、Gamow を否定したものでないこととなります。

しかし問題はそう簡単ではありません。というのは、我々の Oklo の解析では約 20 億年前の  $^{149}\text{Sm}$  などの中性子捕獲共鳴準位のエネルギーを調べていますが [4]、この共鳴エネルギーは電磁相互作用にも強い相互作用にもどちらにも依りうるからです。深堀さんの報告では電磁相互作用は不変であるとの仮定の下に、強い相互作用について議論しています。一方、強い相互作用が不変であると仮定すると、Oklo の解析から微細構造定数の時間変化として以下の値が得られます。

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \sim (4.5 \pm 5.5) \times 10^{-18} y^{-1}. \quad (3)$$

もし、単純な Gamow の考えに従って  $\alpha = \text{const} \times t$  とすると、式 (1) と同様に以下の評価が得られます。

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = t_0^{-1} = 7.3 \times 10^{-11} y^{-1}, \quad (4)$$

従って、この場合には式 (3) と (4) との比較により、上原さんが言うように Gamow の考え方が ( 7 桁ほど ) 否定されたという表現も正しくなります。( より正確には、式 (4) のような現在の値そのものでなく、ここ 20 億年の平均値と式 (3) とを比較すべきですが、オーダーは変わりません。 )

以上で、上原さんへの直接のコメントを終わり、これからはこの分野の最近の発展についてごく簡単に述べたいと思います。ごく簡単といいますが、この分野のここ数年の研究はすさまじい勢いで動いており、あまりに話題が豊富で個々のテーマについて説明するにも数ページを必要するほどで、とても全体を説明しきれないからです。この分野の最近の review として、例えば文献 [5] ( パリティーに翻訳記事が掲載予定 ) などがありますので、興味ある方はそれらを参考にしてください。以下ではその中で個人的に関心の深い数項目についてのみ述べます。

先ず、基本定数が時間と共に動くかどうかという点に関する、Dirac や Gamow などの単純な考えが否定されてから久しいのですが、何故多くの物理屋が今でもこの問題に強い

興味を示すかという疑問からです。勿論人間の基本的な欲求として、理論的に定数とされている物理量が本当に定数かどうかを実験的に、定量的に確かめたいとの気持ちが当然有るでしょう。それに加えて最近の「統一理論」の考えの基では、例えば「超弦理論」のような基本理論があり、そこに現れる結合定数は真の定数ですが、そこから出発して現実の世の中を記述する有効理論へ行き着く過程で、例えば宇宙の発展と共に変化するスカラー場が関与して、その結果我々が観測できる結合定数が時間とともに変化する可能性は十分にあるそうです。この辺の議論は専門家に譲るとして、最近の基本定数に関する幾つかの話題に移りましょう。

先ず、何故最近になってこの問題が特に注目を集めたか理由として最も重要なことは、J.K.Webbらがハワイのマウナケアの Keck I 望遠鏡を用いて行った QSO (Quasi-Stellar Object, 以前クエーサー又は準星と呼ばれた) の分光測定に於いて、約 100 億年以前の微細構造定数が現在と有意に違う結果 [6] を出したことです。もし式 (4) の様な線形関係式を仮定すると大雑把に

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (6.40 \pm 1.35) \times 10^{-16} y^{-1}, \quad (5)$$

となり、Oklo からの値 (20 億年前の値) に比べて 2 桁も大きい、有意にゼロからずれた正の値となります。この発表は大変な衝撃を与え、当時は New York Times にも可成り長い解説記事が掲載されたりしました。しかしさらに最近になって、チリのヨーロッパ南半球観測所の Very Large Telescope を用いた測定 [7] では、有意なズレは測定されなかったという矛盾した結果が得られており、現在も決着が付いていません。

QSO とは別に、 $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$  のベータ崩壊と微細構造定数の時間変化については F.Dyson の有名な考察 [8] があります。このベータ崩壊が、宇宙の年齢より遙かに長い半減期を持つことを利用して、Dyson は現在も地球上に Re が存在することから、微細構造定数の時間変化の上限にある制限が加わるとの議論を展開しました。この点に関しては、我々は最近得られた鉄隕石の精密なデータを利用した解析を行ったところ、単純な Dyson の考察はもはや成り立たないことを示しました [9]。またこの様な隕石のデータと実験室での半減期の測定値とを比較をすることにより、地球の年齢に相当する 46 億年の間での平均的な微細構造定数が現在と違っていたかどうかの情報が得られます [9]。また一方、原子時計を用いた実験室での実験で、大きな精度の向上がタイプの異なった原子時計の進み方を比較することにより得られています。この直接測定により、現在での微細構造定数の時間変化は、ごく最近の E.Peik らの測定では [10]

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-0.3 \pm 2.0) \times 10^{-15} y^{-1}, \quad (6)$$

という上限値を与えています。

ここまで最近の幾つかの話題を取り上げましたが、Oklo から来る上限値 (3) は未だに最小の、最も強い制限を与えている点で、その特別な地位を他の手法に譲り渡していません。

ん。ここで Oklo に関する最近の話題を 1 つ述べてこの小文を締めくくりましょう。我々の解析 [4] では中性子のスペクトルとして最も簡単なボルツマン分布を仮定しました。一方、S.Lamoreaux ら [11] はボルツマン分布を仮定せず別の評価に基づいたスペクトルを用いた計算を行った結果、

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \begin{pmatrix} -2.3 & +0.8 \\ -0.4 & \end{pmatrix} \times 10^{-17} y^{-1}, \quad (7)$$

という、有意にゼロからずれた値 (QSO の値よりは一桁以上小さく逆符号) を得ています。この結論の正当性に関する評価は未だ下されていませんが、結果がスペクトルの変化にかなり敏感なため、注意深い取り組みが求められます。

以上述べたように、微細構造定数の時間変化は核データや原子分子データとの関連が大変深いことが分かると思います。我々や Lamoreaux らが行った Oklo の解析には核データや炉物理が大きな役割を果たしていますが、Re/Os 崩壊でもベータ崩壊の正確な測定値が必要とされます。又、QSO や原子時計の計測は原子分子データと深い関わりを持っています。現在、世界各地でこのような研究が精力的に行われていることを認識してもらえ一助にこの小文がなれば幸いです。

## 参考文献

- [1] P.M.A.Dirac, Nature **139** (1937) 323.
- [2] G.Gamow, Phys.Rev.Lett. **25** (1967) 759.
- [3] R.W.Hellings et al., Phys.Rev.Lett. **51** (1983) 1609.
- [4] Y.Fujii et al., Nucl.Phys. **B573** (2000) 377.
- [5] K.A.Olive and Y-Z. Qian, Physics Today **Oct.2004** (2004) 40.
- [6] J.K.Webb et al., Phys.Rev.Lett. **87** (2001) 091301; M.T.Murphy, J.K.Webb and V.V.Flambaum, Mon.Not.R.Astron.Soc. **345** (2003) 609.
- [7] R.Quast, D.Reimers and S.A.Levshakov, Astron.Astrophys. **415** (2004) L7; R.Srianand, H.Chand, P.Petitjean and B. Aracil, Phys.Rev.Lett. **92** (2004) 121302.
- [8] F.J.Dyson, Phys.Rev.Lett. **19** (1967) 1291.
- [9] Y.Fujii and A.Iwamoto, Phys.Rev.Lett. **91** (2003) 261101.
- [10] E.Peik et al., Phys.Rev.Lett. **93** (2004) 170801.
- [11] S.K.Lamoreaux and R.Torgerson, Phys.Rev.D**69** (2004) 121701.