

従来の物理学を超えた論文集

Beyond Conventional Physics : Branching Universes and Next-Generation Nuclear Fusion Technology

著者： 安カ川 誠

所属： 株式会社センリョウ

E-mail: rijitou@midorijuji.or.jp

分岐宇宙と核融合発電に関する従来の知識を覆す論文集を発表します。すなわち分岐宇宙が実在することを示し、この確認実験により伝統的に説明が求められてきた様々な疑問を解明できることを報告します。また、核融合発電を簡単に実現できる装置の製作が可能なことを発表します。

目次

- 1) 分岐宇宙の存在を確認するための実験提案
- 2) 地球生命出現の必然性
- 3) 分岐宇宙生成装置の提案
- 4) 電子ビーム照射によるプラズマ加熱装置
- 5) 核融合発電実現に向けた課題と解決策の提案

1) 分岐宇宙の存在を確認するための実験の提案

Proposal for an Experiment to Confirm the Existence of Branching Universes

DOI: 10.4236/wjet.2025.132024

Abstract

量子力学には、観測によって波動関数が収縮し、単一の測定値が得られるとするコペンハーゲン解釈の他に、エヴェレットによって提唱された多世界解釈があります。この多世界解釈が正しいとすれば、現実世界は複数の宇宙に分裂し、いわゆる分岐宇宙（並行宇宙）が存在することを意味します。従来、この存在を証明することは不可能と考えられてきましたが、私は以下のような実験を行うことで、論理的に証明できることを発見しました。そこで、宇宙への理解を深めるために、必要な技術と知識を持つ方々に、分岐宇宙の存在を証明する実験を行っていただきたいと思っています。

キーワード: 多世界解釈、非局所長距離相互作用（量子もつれ）、ベルの不等式、二重ス

リット実験。

1. Introduction

非局所的長距離相互作用の存在は、Wheeler の遅延選択実験[1]や Alain Aspect によるベル不等式の破れ[2][3]、そして多くの研究[4]-[7]によって証明されている。この現象は、高周波光信号を低周波光信号に変換するデバイス（ダウンコンバーター）（例えば、ホウ酸バリウム、半反射鏡と光パラメトリック発振を実現する非線形結晶など）を用いて光子対を生成することを可能にする。これにより、一方の光子の挙動が遠く離れたもう一方の光子に影響を与える。私は、分岐宇宙の実在を証明するための実験的手法を提案したい。

2. コペンハーゲン解釈のポイント

コペンハーゲン解釈は、1920 年代にニールス・ボーアとヴェルナー・ハイゼンベルクによって提唱された量子力学の主流の解釈です。

1. 量子状態は確率的にしか決定できません。

粒子の状態は「波動関数」によって記述され、観測されるまでは確率としてのみ存在します。

2. 波動関数は観測によって崩壊します。観測されるまでは電子は「複数の可能性」を秘めていますが、観測の瞬間に一つの結果に収束します。

3. 観測されるまでは「存在している」とは言えません。例えば、「スリット A を通過した」状態の電子と「スリット B を通過した」状態の電子は重ね合わせ状態にあり、観測されるまではどちらのスリットを通過したかは不明です。

1932 年にフォン・ノイマンによって提唱された定式化によれば、量子系と観測者（測定装置）は分離されています。この二つの境界はどこにでも引くことができます。量子系の状態は、観測されていないときは以下のシュレーディンガー方程式に従います。観測によって波動関数は収縮し、結果として 1 つの測定値が得られます。どの測定値が得られるかは確率的であり、ボルンの規則に従います。

3. 多世界解釈のポイント

解釈は、1957 年にプリンストン大学大学院生ヒュー・エヴェレット 3 世が提唱した定式化に基づいています。

1. 波動関数は観測によって収縮しない。観測の瞬間に単純に一つの可能性を選択するのではなく、「全ての可能性が並行して存在し続ける」と考えられます。

2. 宇宙は観測ごとに分岐する。例えば、「スリット A を通った世界」と「スリット B を通った世界」の両方が存在し、観測者もそれぞれの世界に分岐する。

3. 量子力学は決定論的に進む。確率によって決定されるのではなく、全ての可能性が実際に発生し、別々の世界に分岐するだけである。

4. ベルの不等式

測定は2つの異なる場所 A と B で行われる。測定結果は+1 または-1 の2つのみである。A と B の測定装置にはそれぞれ2つの設定があり、測定ごとにランダムに切り替えられ、対応する物理量が測定される。A での測定では物理量 A0 または A1 のいずれかが測定され、B での測定では物理量 B0 または B1 のいずれかが測定され、どちらの測定値も+1 または-1 となる。局所实在論では、

$$|S| \leq 2$$

$$S = (A0B0) + (A0B1) + (A1B0) - (A1B1)$$

であるが、実験では S が 2 を超え、この不等式が破れていることが確認された。

このようなベル不等式の破れに関する研究は数多く発表されている。

[8][9][10][11][12][13][14][15][16][17]

5. 量子もつれ

量子もつれとは、ベル不等式の破れによって証明された現象で、2つの量子系が互いに分離できない状態にあるときに発生します。一方の量子が特定の状態をとると、その情報は瞬時にもう一方の量子に伝達され、その状態が固定化されます。量子もつれ状態にある限り、両者は距離に関わらず相関関係を持ち続けます。このような量子もつれ状態にある粒子を利用した新しい技術開発が進められています。[18]

- (1) 量子コンピュータ量子もつれの存在が明らかになり、量子通信や量子センシングなど、様々な量子技術、特に量子コンピュータが世界中で研究されています。量子コンピュータは、量子重ね合わせや量子もつれといった現象を利用することで、デジタルコンピュータに比べて高速な計算処理を可能にします。[19]
- (2) 量子もつれを用いた暗号通信量子コンピュータに加えて、通信への利用もあります。量子もつれ状態にある光子は、たとえ遠く離れていても、一方を測定することで、他方の状態を瞬時に決定することができます。この性質を古典通信と組み合わせることで、量子状態を転送する「量子テレポーテーション」を実現でき、量子通信に応用することができます。

理論的には、通信相手がどれだけ離れていても量子通信が可能であり、通常の通信のように傍受や盗聴の心配がないため、安全な通信が可能になります。[20]

- (3) この研究論文は、量子もつれ現象がミクロの世界だけでなくマクロの世界にも利用可能であり、具体的には、宇宙全体がマルチバースであるかどうかを判定する方法として利用できることを示しています。

6. 量子干渉縞

アインシュタインとボーアの論争で知られるように、電子線などの量子を用いて二重スリット実験を行うと、スクリーン上に干渉縞が生じます。この干渉縞は、電

子を1つずつ放出しても同じ結果が得られることから、波動粒子二重性を示しています。しかし、観測によって粒子の進路を特定できれば、この干渉縞は消えることが証明されています [20][21]。

ヤングの実験に基づき、整数 m に対して x の位置を x_m としたとき、輝線が発生する条件は以下のとおりです。 $d/L \cdot x_m = m\lambda$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)
ここで、 d は光源間の距離、 L はダウンコンバータとスクリーン間の距離、 λ は光の波長です。

7. 実験方法

量子もつれ状態にある光子を生成することは可能であり{22}、実験を試みた結果、その結果は微小な量子世界だけでなく宇宙全体に影響を及ぼすことが確認され、分岐宇宙の存在が裏付けられている。

実験 1

図 1 に示すように、光源を弱めて光子を一つずつ放出すると、各光子は上側の実線の経路をたどるか、ハーフミラーで反射されて下側の破線の経路をとる。分岐後、各光子は確率的にいずれかの経路をとるが、どちらの経路をとるかは不確定である。そのため、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) などの非線形光学結晶を用いたダウンコンバータ (1) と (2) によって、周波数が半分の量子状態にある二つのもつれ光子に分割された後、それぞれの干渉検出器に入射する際に、光子経路の不確定性のために干渉が生じる。

さらに、この干渉は、ダウンコンバータと各干渉検出器までの距離が異なっても、対をなす光子間の非局所的な長距離相互作用 (量子もつれ) により、両方の検出器で発生します。その結果、光子の集合体であるレーザーパルス光源として用いると、各干渉検出器で干渉縞が観測されます。

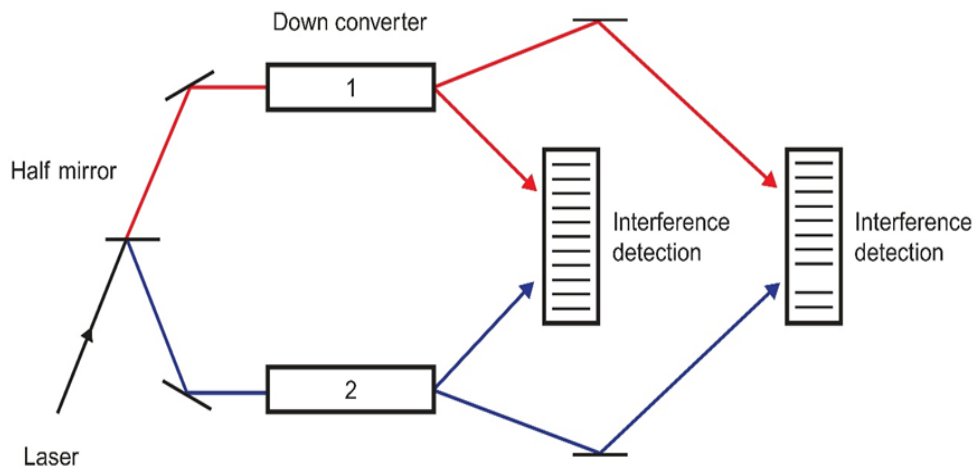


Figure 1. 光子はビームスプリッターを通過し、左または右の経路のいずれかに沿って進みます。この光子はダウンコンバーターで2つの光子になりますが、経路が確定していないため、スクリーン A と B にそれぞれ干渉縞が現れます。

実験 2

次に、図 2 に示すように、干渉検出器の 1 つを粒子検出器に置き換えて観測すると、ビームスプリッターを通過した光子は、(1)または(2)のいずれかの粒子検出器で検出されます。つまり、経路が決まっているため、干渉検出器には一方向からの光子のみが入射し、レーザーパルス照射しても干渉縞は消えます。この干渉縞の消失は、粒子検出器が干渉検出器よりも遠くにある場合でも、非局所的な長距離相互作用（量子もつれ）によって発生します。

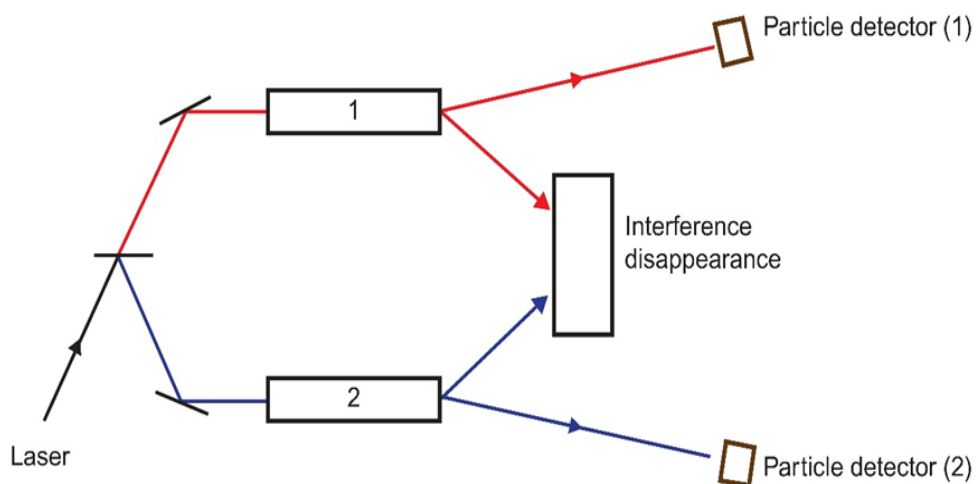


Figure 2. 光子はハーフミラーを用いて2つの経路のうちの1つを進みます。この光子はダウンコンバーターで2つの光子に変換され、そのうちの1つがいずれか

の粒子検出器で観測されるため、経路が決定され、スクリーン上に干渉縞は見られません。

実験 3

さらに、図 3 に示すように、両方の干渉検出器で干渉が生じるように光子経路を設定した後、検出器 A で干渉縞が観測された場合、装置は検出器 B を直ちにに取り外し、粒子検出器で光子を検出できるように構成されています。

干渉検出器では、取り外し時の振動を防止するために液晶調光フィルムを使用しています。このフィルムは、通電されていない状態では不透明になり、画像投影スクリーンとして機能し、表面に干渉縞が生じる可能性があります。しかし、通電すると透明になり、光子が透過して、背後にある粒子検出器で光子として検出されます。干渉検出器 A には、スクリーン上の干渉縞の存在を自動的に検知・判定するカメラが設置されています。これらの干渉縞の画像は、実験 1 および予備実験 3 で生成されたものと同じであるため、判定は容易です。

さて、このカメラは液晶光変調フィルムの導電系に接続されており、干渉縞が検出されると直ちに通電され、フィルムが透明になります。しかし、通電からフィルムが透明になるまでには 0.1 秒の遅延があり、光子がミラー間の反射を経て干渉検出器 B に到達する時間はそれを上回る必要があります。そのため、遠方ミラーの設置場所は高度 3600km の静止軌道上の衛星が適切と考えられます。

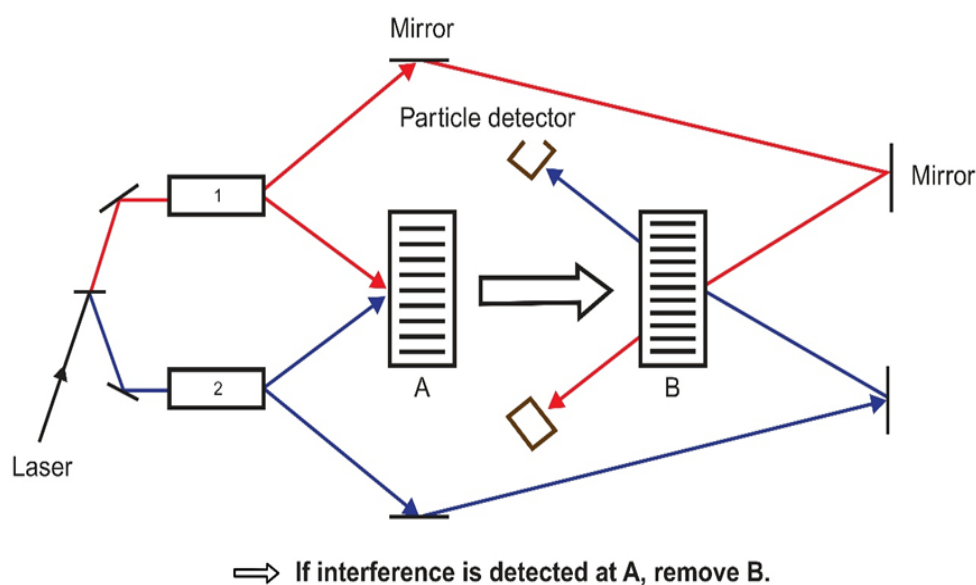


Figure 3. 光子はハーフミラーを通過して左右どちらかの経路を進みます。その光子はダウンコンバーターで 2 つの光子になり、スクリーン A で干渉縞が観測され

た場合、光子の経路は未確定であるため、スクリーン B にも干渉縞が現れます。しかし、スクリーン A で干渉縞を観測した直後にスクリーン B を取り除いた場合、経路が確定していない光子はどちらの粒子検出器でも観測されません。

a) この場合、実際に A で干渉が検出され、B の干渉検出器が除去されると、B の光子は粒子として観測され、対をなす光子の観測結果が異なり、図(2)の実験と矛盾する。

b) さらに、A で干渉が検出されず、B の干渉検出器も除去されない場合、もう一方の干渉検出器でも干渉は発生しないため、図(1)の実験と矛盾する。したがって、干渉検出器除去装置を単に設置するだけでは、どちらの場合も矛盾する結果しか得られない。

8. 期待される結果

実験に矛盾がない場合、図 3 に示す実験結果は以下になると期待されます。つまり、干渉検出器 B が機器の故障により取り外されず、その他の理由により実験が行われなかったということです。機器が正常に動作していることを確認した上で、何度実験を繰り返しても、常に同じ結果が得られます。

9. 結論

量子もつれ現象をコペンハーゲン解釈によって説明しようと、弱測定に関する研究[22]や量子決定理論[23]が提案されてきたが、決定的な実験的証拠は提示されていない。しかし、実験(1)と(2)が確認され、さらに実験(3)が期待通りの結果が得られれば、多くの試みが成果に結びつかなかった原因は、マクロの世界における確率論的にほぼ不可能な様々な現象に起因している可能性が高く、そのような異常現象は、我々の知る限り、理由なく発生するものではない。干渉検出器を取り除こうとする試みは、何らかの事象の発生につながり、それが奇妙な観測結果を引き起こしたはずである。そのような事象としては、トラックの振動、突然の停電、地震、大気擾乱、衛星への隕石衝突などが挙げられ、これらの事象は実験ごとに発生すると考えられている。つまり、宇宙には観測者が存在する枝が多数存在し、実験者はこの奇妙な事実を統計的に証明できるということである。最後に、「科学的方法：物理学の完全性を維持する」[24]と題された論文に言及したいと思います。この論文は、ジョージ・エリスとジョー・シルクが主張するように、宇宙に関する思索的な理論を実験的検証から免除しようとする試みは科学を弱めると示唆しています。

References

[1] Jacques, V., Wu, E., Grosshans, F., Treussart, F., Grangier, P., Aspect, A. and

Roch, J. (2007) Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment. *Science*, 315, 966-968.

[2] Aspect, A. (1971) Contribution à l'étude de la spectrographie de Fourier par holographie.

<https://doi.org/10.1088/0029-4780/1/2/498>

[3] Aspect, A. (1983) Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarisation de photons. Master's Thesis, Université de Paris-Sud.

[4] Freedman, S.J. and Clauser, J.F. (1972) Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. *Physical Review Letters*, 28, 938-941.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.28.938>

[5] Aspect, A., Grangier, P. and Roger, G. (1981) Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. *Physical Review Letters*, 47, 460-463.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.47.460>

[6] Aspect, A., Grangier, P. and Roger, G. (1982) Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken Experiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Physical Review Letters*, 49, 91-94.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.91>

[7] Aspect, A., Dalibard, J. and Roger, G. (1982) Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49, 1804-1807.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.1804>

[8] Grangier, P., Roger, G. and Aspect, A. (1986) Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *Europhysics Letters (EPL)*, 1, 173-179.

<https://doi.org/10.1209/0295-5075/1/4/004>

[9] Jelezko, F., Volkmer, A., Popa, I., Rebane, K.K. and Wrachtrup, J. (2003) Coherence Length of Photons from a Single Quantum System. *Physical Review A*, 67, Article ID: 041802.

<https://doi.org/10.1103/physreva.67.041802>

[10] Zeilinger, A., Weihs, G., Jennewein, T. and Aspelmeyer, M. (2005) Happy Centenary, Photon. *Nature*, 433, 230-238.

<https://doi.org/10.1038/nature03280>

[11] Jacques, V., Wu, E., Toury, T., Treussart, F., Aspect, A., Grangier, P., et al. (2005) Single-Photon Wavefront-Splitting Interference. *The European Physical Journal D*, 35, 561-565.

<https://doi.org/10.1140/epjd/e2005-00201-y>

- [12] Bohr, N. (1984) Spectroscopie de Fourier par holographie à haute luminosité. In: Wheeler, J.A. and Zurek, W.H., Eds., Quantum Theory and Measurement, Princeton University Press, 9-49.
- [13] Greenstein, G. and Zajonc, A.G. (1997) The Quantum Challenge. Jones and Bartlett Publishers.
- [14] Hellmut, T., Walther, H., Zajonc, A.G. and Schleich, W. (1987) Delayed-choice experiments in quantum interference. Physical Review A, 35, 2532.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.35.2532>
- [15] O'Brien, J.L., Zhou, X.-Q., Roberto, A., Lawson, T., Laing, A. and Martín-López, E. (2012) Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling. Nature Photonics, 6, 773-776.
<https://doi-org/10.48550/arXiv.1111.4147>
- [16] Martín-López, E., Laing, A., Lawson, T., Alvarez, R., Zhou, X. and O'Brien, J.L. (2012) Experimental Realization of Shor's Quantum Factoring Algorithm Using Qubit Recycling. Nature Photonics, 6, 773-776.
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.259>
- [17] Moreau, P.A., et al. (2019) Imaging Bell-Type Nonlocal Behavior. Science Advances, 5, eaaw2563.
- [18] Kasai, K., Zhang, Y. and Sasaki, M. (2004) 3-4 Generation and Application of Quantum-Correlated Twin Beams. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 51, 69-78.
- [19] Toyoshima, M., et al. (2015) Current Status of Research and Development for Space Quantum Cryptography Communications in NICT. 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), New Orleans, 26-28 October 2015, 1-5.
- [20] Harada, K., Akashi, T., Takahashi, Y., et al. (2021) Electron Interference Experiment with Optically Zero Propagation Distance for V-Shaped Double Slit. Applied Physics Express, 14, Article ID: 022006.
<https://doi.org/10.35848/1882-0786/abd91e>
- [21] Tosima, K. and Harimoto, T. (2018) Simultaneous Observation of Optical-Wave and Single-Photon Interferences with a Michelson Twin Interferometer. Japanese Journal of Optics: Publication of the Optical Society of Japan 47, 8, 346-350.
- [22] Aharonov, Y., Albert, D.Z. and Vaidman, L. (1988) How the Result of a Measurement of a Component of the Spin of a Spin-1/2 Particle Can Turn Out to

Be 100. Physical Review Letters, 60, 1351-1354.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.60.1351>

[23] Takahashi, T. (2013) Rationality in Quantum Decision Theory. Kagaku Tetsugaku, 46, 17-30.

<https://doi.org/10.4216/jpssj.46.17>

[24] Ellis, G. and Silk, J. (2014) Scientific Method: Defend the Integrity of Physics. Nature, 516, 321-323.

<https://doi.org/10.1038/516321a>

2) 地球上の生命の出現の必然性

The inevitability of the emergence of life on Earth

Abstract

フレッド・ホイル博士は、地球上で生命が誕生する確率は極めて低く、ありそうにないと主張していますが、これに対しては、明確で裏付けのある反論が未だに存在しません。私は、分岐宇宙の存在を証明する実験が可能であることを示しました[1]。この実験結果は、現在の世界が宇宙誕生以来、多くの分岐を経て形成されたことを示し、生命が誕生する宇宙が存在することはむしろ必然的であり、地球上での生命の誕生を科学的に説明できることを示しています。さらに、このシナリオで生命が誕生するならば、私たちが他の宇宙文明に遭遇しないことも必然的であることを示したいと思います。

keyword : 酵素、生命誕生の確率、フェルミのパラドックス、量子もつれ、分岐宇宙

1. はじめに

生命の起源に関する主流の仮説は、原始スープ説です。これは、太古の地球の海で様々な有機化合物がランダムに結合し、生命の構成要素が作られたというものです。しかし、ホイル博士はこの文脈における「ランダム」という概念に強く異議を唱えました。彼の計算によると、生命に必要なすべての酵素が正しく結合する確率は「10 の 4 万乗分の 1」という驚異的な値であり、これは宇宙の原子数（約 10 の 80 乗）と比較すると信じられないほど小さな「奇跡的な確率」です。彼が用いる典型的な例えは「竜巻が廃品置き場を通過

してボーイング 747 を組み立てる確率」であり、彼はそれは不可能だと主張しています。実際には、地球上に生命が豊富に存在するという事実は、多くの科学者がこの説を反駁しようと試みるきっかけとなっています。

1. パンスペルミア説。生命体は宇宙から来たという説です。[2]
2. RNA ワールド仮説の問題点 [3][4]：様々な核酸類似体が、RNA の独特な結合パターンを自らの体内で獲得したという証拠はありません。RNA は DNA に比べて不安定な分子であり、分解しやすいです。自己複製する RNA 分子は発見されていません。
3. タンパク質ワールド仮説の問題点 [5]：ペプチドには自己複製能力がありません。タンパク質は RNA ほど不安定ではありませんが、分子構造は依然として不安定です。特定の構造を持つ酵素などの分子が、ランダムに重合したアミノ酸から自然に生じたとは考えにくいです。このような説は数多くありますが、これらはあくまで仮説であり、十分な証拠を提供していません。パンスペルミア説は古代から存在し、その可能性の探究は続けられていますが、フレッド・ホイル博士が主張するように、酵素が正しく配列するには地球上の原子の数よりも多くの試行回数が必要であるとすれば、この説が成り立つとは考えにくいでしょう。

2. ドレイクの式

宇宙に文明が存在する確率に関する研究としては、ドレイクの式を用いた推定がよく知られています。天文学者フランク・ドレイクが提唱した式 ($N = R^* \times fp \times ne \times fl \times fi \times fc \times L$) は、天の川銀河に存在するコミュニケーション能力を持つ知的生命体の数を算出しようとしたものです。この式に基づくと、天の川銀河には複数（数十から数百万と幅広く）の知的文明が存在すると推定されます。ここで、各パラメータは以下の意味を表します。

R^* ：銀河系内で年間に生成される恒星の数

fp ：惑星を持つ恒星の割合

ne ：生命が存在する可能性のある惑星の数

fl ：生命が実際に誕生する惑星の割合

fi ：知性を発達させる生命の割合

fc ：通信可能な技術を発達させる知的生命の割合

L ：そのような文明の平均寿命（年）

適した惑星の存在：太陽系外惑星の発見が進んでおり、ハビタブルゾーン（生命が存在可能な温度域）に位置する地球型惑星も数多く発見されています。ケプラー宇宙望遠鏡などの観測結果から、銀河系内だけでも数十億個の地球型惑星が存在すると推定されています。これは、生命の誕生に適した環境を持つ天体が数多く存在することを示唆しています。

生命起源の化学過程：1953 年のミラー実験は、原始地球の環境を模倣した条件下でアミ

ノ酸が自然発生的に生成することを示し、生命の構成要素が自然発生的に生成し得ることを明らかにしました。また、アミノ酸やウラシルといった生命の基本構成要素は小惑星リュウグウの試料中に見つかっており、生命の構成要素は宇宙全体に広く存在していると考えられています。さらに、実験系における「RNA ワールド」の研究により、自己複製可能な RNA システムが形成される可能性が示唆されています。

生命起源の地：生命の起源については、「温泉説」「海底熱水噴出孔説」「干潟説」「宇宙到着説（パンスペルミア説）」など、様々な説があり、明確な結論は出ていません。しかし、これらの環境は宇宙全体に広く存在しているため、生命が誕生する機会は数多く存在すると考えられています。

3. フェルミのパラドックス [6][7][8][9][10][11]

生命が普遍的に存在するならば、技術的に高度な文明も数多く存在するはずですが、なぜその証拠が見つからないのかというパラドックスが指摘されています。この問いは、生命や知的生命の普遍性に反する議論としてしばしば提起され、「グレート・フィルター仮説」（知的生命が宇宙に進出する前にそれを一掃する障壁が存在する）や「動物園仮説」（高度な文明は私たちを観察していても干渉しない）など、いくつかの可能な答えが提案されています。

4. 多世界解釈

エヴェレットによって提唱された多世界解釈があります。この多世界解釈が正しいとすれば、現実世界は多くの世界に分裂し、いわゆる分岐宇宙（並行宇宙）が存在することになります。つまり、この多世界への分岐は、宇宙が始まって以来、あらゆる可能性が考えられる限り、常に起こっていたのです。

つまり、私たちが今いる宇宙もその一つに過ぎず、すべての並行宇宙を考慮すれば、そこに生命が誕生する機会は極めて多く、ほぼ無限と言ってもいいでしょう。

5. 地球における生命の誕生に要した時間

地球が誕生したのは 46 億年前ですが、海が形成されたのは 40 億～43 億年前、生命が誕生したのは 38 億～35 億年前と考えられています。つまり、生命が海で誕生したとすれば、誕生に必要な時間は約 5 億年ということになります。

5. 分岐宇宙が実際に存在する場合の生命誕生のシナリオ

フレッド・ホイル博士の計算が正しく、生命に必要な酵素がすべて存在する確率が 10 の 4 万乗分の 1 だとしても、我々の宇宙を含め分岐宇宙の数はほぼ無限であるため、海水などに酵素が存在するケースも必然的に存在します。したがって、いずれかの分岐宇宙で生命活動が始まり、5 億年かけて生命が誕生することはむしろ必然です。つまり、我々はその稀少な分岐宇宙に存在し、他の分岐宇宙には生命は存在しないということです。

6. 分岐宇宙の存在を証明するための実験的方法

分岐宇宙の存在は生命の出現を説明できるかもしれないが、実験的検証がなければ、この

概念は仮説にとどまり、経験的証明が必要となる。

非局所的な長距離相互作用（量子もつれ）の存在は、ホイーラーの遅延選択実験やアラン・アスペクトによるベル不等式の破れ [12][13]、そしてその他多くの研究 [14]-[17] によって証明されている。この現象を利用することで、高周波光信号を低周波光信号に変換する装置（ダウンコンバーター）（例えばホウ酸バリウム、半反射鏡を実現する非線形結晶、あるいは光パラメトリック振動（一方の光子の挙動が遠距離にあるもう一方の光子に影響を与える）を用いて光子対を生成することができる。[1]では、この量子もつれ状態にある光子を用いた実験を行っている。

7. 実験の概要

実験 1

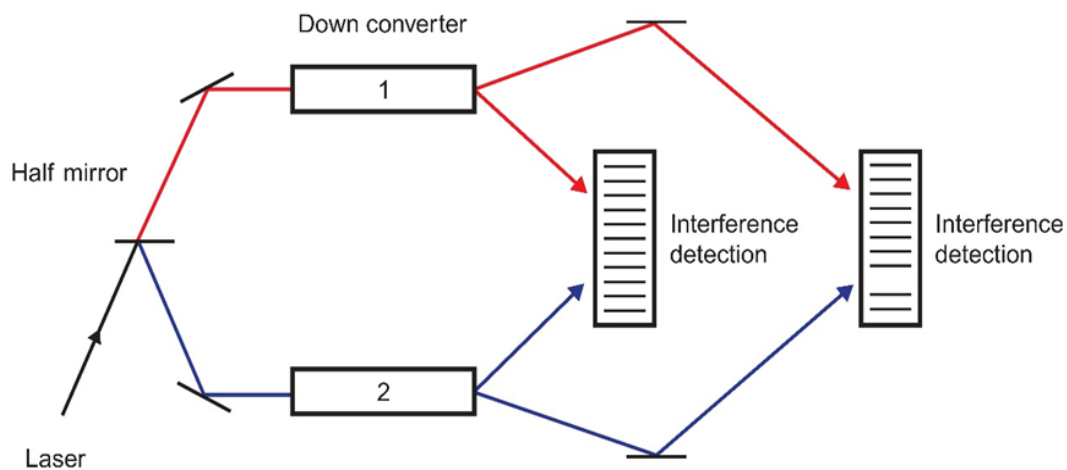


Fig.1. ハーフミラーとダウンコンバータを通過する光子の経路が不確定な場合の干渉縞生成の概略図。

光子はビームスプリッターを通過して左または右の経路のいずれかに沿って進み、ダウンコンバータで2つの光子に分割されますが、経路が決定されていないため、干渉縞がそれぞれスクリーン A と B に表示されます。

実験 2

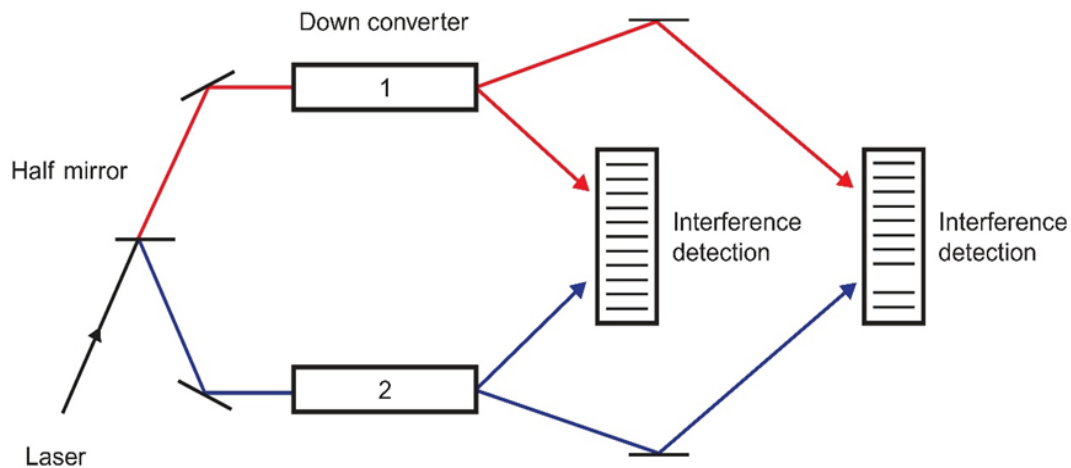


Fig.2. ダウンコンバータを通過する光子の経路が決まると干渉縞が消える様子を示す図

光子はハーフミラーを使用して 2 つの経路のうちの 1 つに沿って進み、ダウンコンバータで 2 つの光子になります。これらの光子の 1 つが粒子検出器の 1 つによって観察されるため、経路が決定され、画面上に干渉パターンは表示されません。

実験 3

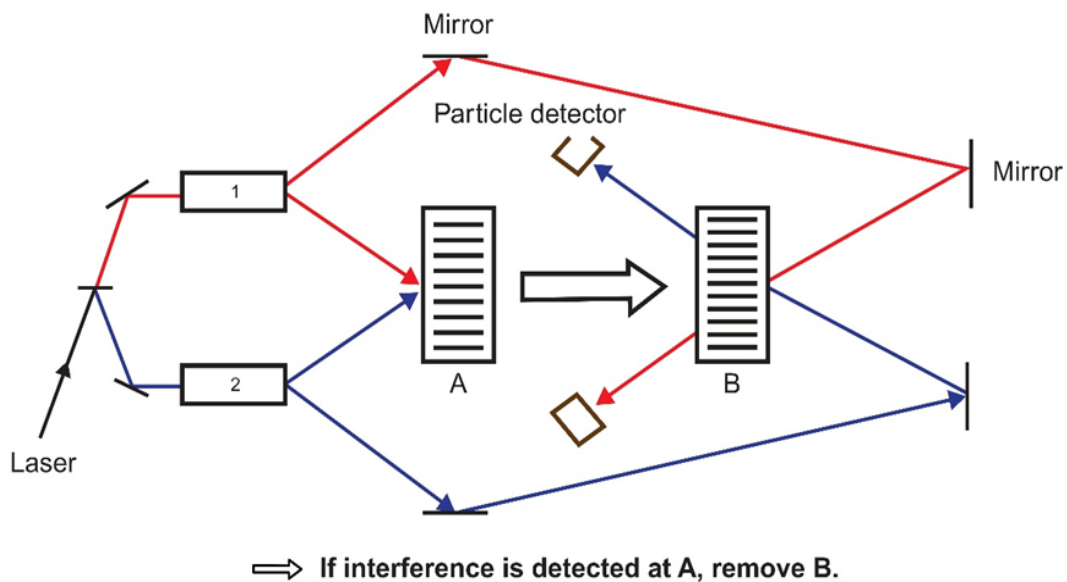


Fig.3. A での干渉縞の観察がスクリーン B の除去に依存する様子を示す概略図。

光子はハーフミラーを通過し、左または右の経路のいずれかに沿って進み、ダウンコンバータで 2 つの光子になります。スクリーン A で干渉パターンが観測されると、光子の経路が未決定であるため、スクリーン B にも干渉パターンが現れます。しかし、スクリーン A で干渉パターンを観測した直後にスクリーン B を取り除くと、経路が未決定の光子はど

ちらの粒子検出器でも観測されません。

- a) この場合、実際に A で干渉を検出し、B の干渉検出器を取り除くと、B の光子は粒子として観測され、光子対について異なる結果が得られ、図 2 の実験と矛盾します。
- b) また、A で干渉が検出されず、B の干渉検出器も取り除かない場合は、他の干渉検出器では干渉が発生しません。これは図 1 の実験と矛盾します。したがって、干渉検出器除去装置を単に設置するだけでは、どちらの場合も矛盾する結果しか得られません。
- c) しかし、静止衛星に鏡が設置されている場合、環境中に装置が存在することによる振動や空気の乱れの影響で、粒子が粒子検出器に到達しない可能性があります。そこで、予備実験として A で干渉縞を検出できたとしても、B で干渉縞除去操作を行わずに複数回の実験を行い、B で干渉縞が観測される確率を求めます。この確率と、本実験における B での干渉検出器除去操作後の粒子検出確率を比較することで、実験の妥当性を確認することができます。

8 期待される結果

実験に矛盾がなければ、図 3 に示す実験の結果は、干渉検出器 B が機器の故障により取り外されなかったか、その他の理由で実験が実施されなかったことと想定される。

すなわち、干渉検出器 B を取り外さない実験では干渉縞が観測されるのに対し、干渉検出器 B を取り外そうとした実験では、光子の進路に設置された粒子検出器において粒子を検出する確率が、環境に起因する未知の理由により、突然ゼロになることが観測されている。

これは、機器が正常に動作していることを確認した後、何度繰り返しても同じ結果になる。

実験(1)と(2)が確認でき、さらに実験(3)が期待通りの結果が得られた場合、多くの試みが失敗した原因は、確率的にほぼ不可能なマクロの世界における様々な現象が関与している可能性が高く、我々の知る限り、このような異常現象は理由なく発生するものではない。干渉検出器を取り除こうとする試みは、何らかの事象を引き起こし、奇妙な観測結果をもたらすはずです。例えば、トラックの振動や突然の停電などです。これらの事象は各実験で発生すると考えられています。つまり、各宇宙には観測者が存在する複数の分岐があり、実験者はこれらの分岐した宇宙が存在するという奇妙な事実を統計的に証明できるのです。

9. Conclusion

もしこの実験によって分岐宇宙の存在が証明されれば[17]、たとえフレッド・ホイル博士の計算が正しいとしても、無数の分岐宇宙の中には、生命の発達に必要な酵素が全て揃った宇宙が必ず存在することになる。つまり、我々は地球上の生命が誕生した分岐宇宙に偶然生きているに過ぎない。従来の仮説とは異なり、この生命誕生のシナリオは科学的に妥当性があり、生命の誕生が必然であることは明らかである。さらに、生命がこのシナリオでのみ存在するのであれば、フェルミのパラドックスへの答えも明らかになる。つまり、他の惑星では生命は誕生しておらず、我々が技術的に進歩した生命に遭遇しないのも当然である。

References

- [1] Proposal for an Experiment to Confirm the Existence of Branching Universes
DOI: 10.4236/wjet.2025.132024
- [2] Panspermia hypothesis and the possibility of extraterrestrial life.
Akihiko Yamagishi (School of Life Sciences, Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences)
- [3] Peptide Bond Formation between Aminoacyl-Minihelices by a Scaffold Derived from the Peptidyl Transferase Center
<https://doi.org/10.3390/life12040573>
- [4] How did life begin? One key ingredient is coming into view
doi.org/10.1038/d-41586-023-00574-4
- [5] PROTEIN 0TH-ORDER STRUCTURES AND THE ORIGIN OF LIFE
DOI:10.50968/vivaorigino.37.3_47
- [6] Dissolving the Fermi Paradox
arXiv:1806.02404v1
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.02404>
- [7] Eric M Jones. Where is everybody? an account of fermi's question.
Technical Report LA-10311-MS, Los Alamos National Laboratory, 1985.
<https://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0055.pdf>.
- [8] Frank Drake, Douglas A Vakoch, and Matthew F Dowd. The Drake Equation: Estimating the Prevalence of Extraterrestrial Life through the Ages.
Number 8. Cambridge University Press, 2015.
- [9] J. Achenbach. Life beyond earth. National Geographic, 197:24, 2000.
- [10] Steven J. Dick. Seti. In John Lankford, editor, History of Astronomy: An Encyclopedia, chapter SETI, page 458. 1997.
- [11] Claudio Maccone. Seti and seh (statistical equation for habitables). Acta Astronautica, 68(1):63–75, 2011.

- [12]. P. Grangier, G. Roger, and A. Aspect, *Europhys. Lett.* 1, 173 (1986).
- [13]. F. Jelezko, A. Volkmer, I. Popa, K. K. Rebane, and J. Wrachtrup, *Phys. Rev. A* 67, 041802 (2003).
- [14] A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein, and M. Aspelmeyer, *Nature* 433, 237 (2005).
- [15]. V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, and J.-F. Roch, *Eur. Phys. J. D* 35, 561-565 (2005).
- [16] N. Bohr, pp.9-49 in *Quantum Theory and Measurement*, edited by J. A. Wheeler and W. H. Zurek., (Princeton University Press, 1984).
- [17]. G. Greenstein and A. G. Zajonc, *The Quantum Challenge* (Jones and Bartlett Publishers, 1997)

3) 分岐宇宙生成装置の提案

Proposal for a Device to Generate Branching Universe

DOI: 10.4236/wjet.2025.133037

Abstract

文献[1]によれば、量子もつれ現象を用いた実験により、現実世界は波動関数で記述されるのではなく、複数の世界に分裂する分岐宇宙であることが示されています。この実験手法を改良し、サイコロのような乱数発生器を組み込み、出た目に基づいてスリット除去の有無を決定する機構を組み込むことで、この実験装置は分岐宇宙の存在を証明するだけでなく、サイコロの特定の目が出現し続ける新たな分岐宇宙を生成する装置としても機能することが実証されました。さらに、このような物理的装置と人間の意識との間に相互作用が生じる可能性が示唆され、1998年に開始されたグローバル意識プロジェクトへと繋がりました。本稿では、超心理学実験との関連性についても考察します。

Keywords : 多世界解釈、非局所的長距離相互作用（量子もつれ）、ベルの不等式、二重スリット実験、乱数発生器

1. Introduction

量子力学においては、アラン・アスペクトをはじめとする多くの研究によって、非局

所的な長距離相互作用の存在が実証されています。「量子もつれ」と呼ばれるこの現象は、2つの量子系が不可分な状態にある場合に発生し、一方の量子が特定の状態をとると、その情報がもう一方の量子に瞬時に伝達され、それによってその状態が決定されます。この現象は、量子コンピュータや暗号通信の技術開発に利用されています。また、分岐宇宙の存在などの考察も進められており、[1]ではコペンハーゲン解釈ではなく多世界解釈が正しいことが示唆されています。

2. 乱数ジェネレータ[2]

乱数は、特定の規則やパターンを持たずにランダムに生成される値です。そのため、乱数生成器に大きな偏りが生じるには、何らかの原因があると考えられます。その原因の一つとして人間の意識が考えられており、グローバル・コンシャスネス・プロジェクト[3]は、この可能性を科学的に検証した研究です。

3. グローバル意識プロジェクト

ネバダ州で開催された「バーニングマン」というイベントに乱数発生器を持ち込んだ研究では、イベントのクライマックスで「ザ・マン」として知られる巨大な像が燃やされた際に、乱数に大きな偏りが見られました。さらに、オリンピックや新年といった世界的なイベントは、しばしば乱数に偏りをもたらしことが報告されています。特に、2001年9月11日の同時多発テロ当日には、極端な変動が観測されました。

第一に、すべての乱数発生器の変動の相関は、年間を通してその日に最も高かった。

第二に、累積変動はテロ発生時から極めてプラスに振れ、その後マイナスに転落した。この変動は標準偏差の6.5倍にも達した。

第三に、移動平均のピークはテロ発生時付近で観測され、その発生確率は1000万分の1であった。

これらの結果は6人の統計学者によって独立して分析され、一貫した結論に達しました。

4. 量子もつれの証拠の歴史

ホイーラーの遅延選択実験やアラン・アスペクトのベル不等式の破れの実験[4][5]といった現象、そしてその他多くの研究[6][7][8][9]によって、非局所的な長距離相互作用の存在が実証されています。この現象は、例えば、ビームスプリッターや光パラメトリック発振器などの非線形結晶を通して高周波光信号を低周波光信号に変換する装置（ダウンコンバーター）を用いて光子対を生成する際に、一方の光子の挙動が遠く離れたもう一方の光子に影響を与えることを示唆しています。ちなみに、アラン・アスペクトはこの研究でノーベル賞を受賞しました。

5. コペンハーゲン解釈と多世界解釈の特徴

1) コペンハーゲン解釈

量子状態は確率的にしか決定できず、粒子の状態は「波動関数」によって記述され、観測されるまでは確率的にのみ存在します。つまり、観測前は電子は「複数の可能性」を持っていますが、観測の瞬間に一つの結果に収束します。したがって、観測されるまでは「存在する」とは言えません。

2) 多世界解釈

波動関数は観測によって収束しません。観測が行われるとき、ただ一つの可能性が選ばれるのではなく、「すべての可能性が並行して存在し続けている」のです。観測が行われるたびに、宇宙は分岐します。量子力学は決定論的に発展します。確率によって決定されるのではなく、すべての可能性が実際に起こり、別々の世界に分岐します。

6. ベルの不等式

2つの異なる場所 A と B で測定が行われます。測定結果は+1 または-1 の2つの値のみとなります。A と B の測定装置はそれぞれ2つの異なる設定を持ち、各測定において設定がランダムに切り替えられ、対応する物理量が測定されます。A での測定では物理量 A0 または A1 のいずれかが測定され、B での測定では物理量 B0 または B1 のいずれかが測定され、どちらの測定結果も+1 または-1 となります。局所实在論では、以下の式が成り立ちます。

$$|S| \leq 2$$

$$S = (A0B0) + (A0B1) + (A1B0) - (A1B1)$$

しかし、実験では S が 2 を超えることが観測されており、この不等式が破れていることが確認されています。このベルの不等式の破れに関する多くの研究が発表されています[10][11][12][13][14][15]。

7. 量子もつれ

量子もつれは、ベル不等式の破れによって証明された現象であり、2つの量子系が分離できない状態です。一方の量子が特定の状態をとると、その情報は瞬時にもう一方の量子に伝達され、その状態が決定されます。この量子もつれは、量子もつれ状態にある限り、粒子が空間的にどれだけ離れていても相関関係を持ち続けます。

[16][17]

このような量子もつれ状態にある粒子を用いた新しい技術開発が進められています。

(1) 量子コンピュータ[18]

量子もつれの存在が明らかになり、量子通信や量子センシングなど、様々な量子技術が世界中で研究されており、特に量子コンピュータが注目されています。量子コンピュータがデジタルコンピュータに比べて高速に計算を実行できるのも、量子重ね合わせや量子もつれといった量子の振る舞いを利用するためです。

(2) 量子もつれに基づく暗号通信 [19]

量子コンピュータに加え、通信にも利用されている。もつれ合った光子は、どれだけ離れていても、そのうちの1つを測定することでその状態を瞬時に決定することができる。この性質を古典通信と組み合わせることで、量子状態を転送する「量子テレポーテーション」を実現し、量子通信への応用が可能になる。理論的には、量子通信は距離に関係なく可能であり、従来の通信のように傍受や盗聴の心配がないため、安全な通信が可能となる。

- (3) 参考論文 [1] は、量子もつれの現象がこのミクロな世界だけでなく、マクロな世界、特に宇宙全体がマルチバースであるかどうかを理解するために利用できることを示している。本提案論文は、量子もつれを利用してマルチバースの存在を知ることができるだけでなく、マクロな世界で実験者が所望の分岐宇宙を生成できる装置を作成するための実験も可能であることを実証することを目的としている。

8. 量子干渉縞

電子線などの量子実体を用いて二重スリット実験を行うと、スクリーン上に干渉縞が現れる。この干渉縞は粒子の波動性を示すものであり、電子を1つずつ放出しても同じ結果が得られる。しかし、観測によって粒子の軌道を特定できれば、この干渉縞は消えることが証明されている[20][21]。

ヤングの実験によれば、整数 m に対して位置 x_m に明るい縞が生じる条件は以下の通りである： $(d/L) \cdot x_m = m \lambda$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) ここで、 d は光源間の距離、 L はダウンコンバータとスクリーン間の距離、 λ は光の波長である。

9. 実験方法

量子もつれ状態にある2つの光子を生成することが可能であり[22]、これらの光子を用いて以下のような実験を行うことができる。

実験 1

図(1)に示すように、光源を弱めて光子が1つずつ放出されると、各光子は左上の実線に沿った経路、または半透明鏡で反射されて右下の点線に沿った経路のいずれかを取る。光子は確率的にこれらの経路のいずれかを取るが、どちらの経路を取るかは不確定である。そこで、光子はニオブ酸リチウム(LiNbO₃)などの非線形光学結晶を用いたダウンコンバータ[23](1), (2)を通過し、光パラメトリック過程と呼ばれる過程を経て、周波数が半分の2つの量子もつれ光子に分割され、それぞれの干渉検出器に入る。光子の経路が不確定であるため、干渉が発生する。この干渉は、ダウンコンバータから各干渉検出器までの距離が異なっても、光子対の非局所的な長距離相互作用（量子もつれ）により、両方の検出器で発生する可能性がある。したがって、光子の集合であるレーザーパルス光源として使用すると、各干渉検出器で干渉縞を観察できます。

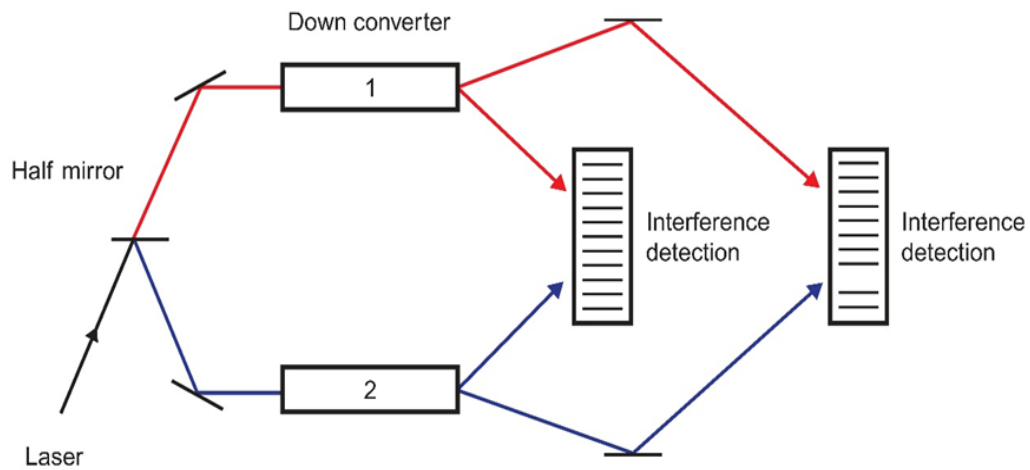


Fig.1 ハーフミラーとダウンコンバータを通過する光子の経路が不確定な場合の干渉縞生成の概略図。

実験 2

次に、図(2)に示すように、干渉検出器の1つを取り外し、粒子検出器に置き換えると、ビームスプリッターを通過した光子は、(1)または(2)のいずれかの粒子検出器で検出されます。つまり、経路が決まっているため、干渉検出器には片側からの光子しか入射せず、レーザー光を照射しても干渉縞は消えます。この干渉縞の消失は、非局所的な長距離相互作用（量子もつれ）によって生じており、粒子検出器が干渉検出器よりも遠くに配置されていても、干渉縞は消えます。

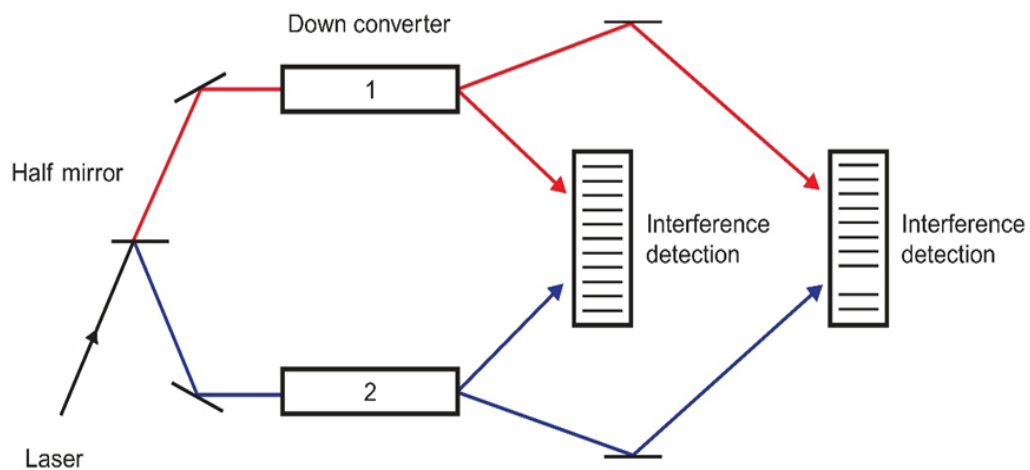


Fig.2 ダウンコンバータを通過する光子の経路が決まると干渉縞が消える様子を示す図。

実験 3

さらに、図(3)に示すように、両方の干渉検出器で干渉が発生するように光子の進路を

設定した後、検出器 A で干渉縞が観測された場合、装置は直ちに検出器 B を取り外し、粒子検出器で光子を検出できるように設定されています。干渉検出器では、取り外し中に振動が発生しないように、液晶光変調フィルムを使用します。このフィルムは、通電されていない状態では不透明なスクリーンとして機能し、表面に干渉縞を生成します。しかし、通電するとフィルムは透明になり、光子は透過して、背後にある粒子検出器で光子として検出されます。検出器 A には、スクリーン上に干渉縞が発生しているかどうかを自動的に検知・判定するカメラが設置されており、これらの干渉縞は実験 1 および予備実験 3 で生成されたものと同じであるため、判定は容易です。このカメラは液晶光変調フィルムの電源システムに接続されているため、干渉縞が検出されると、フィルムは直ちに通電され透明になります。しかし、通電後、フィルムが透明になるまでに 0.1 秒かかるため、光子が鏡の間の反射によって検出器 B に到達する時間は、この時間を超える必要があります。そのため、高度 3,600km の静止軌道上の衛星に遠方の鏡を設置することが検討されています。

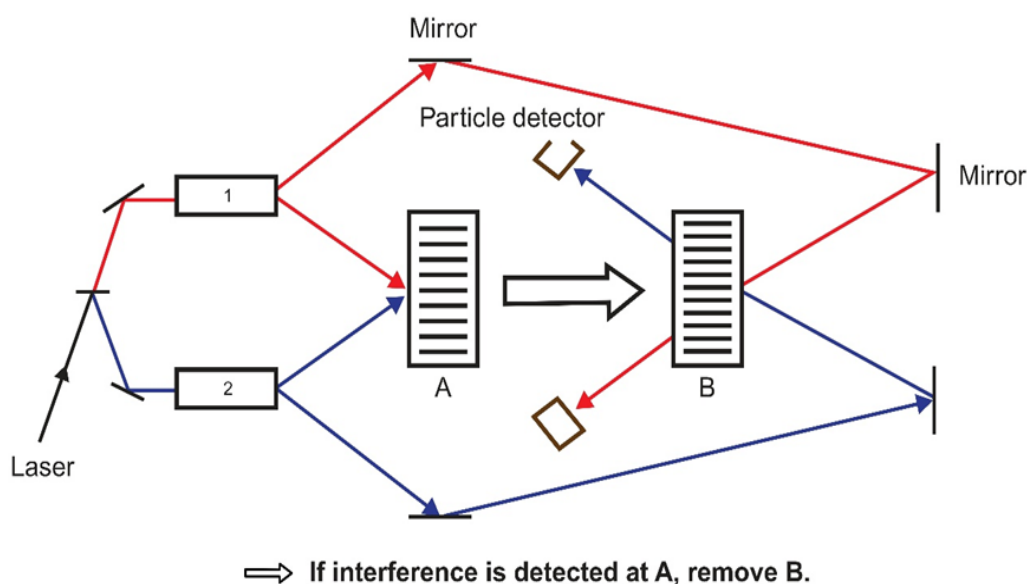


Fig.3 A での干渉縞の観察がスクリーン B の除去に依存する様子を示す概略図

10. 従来装置から期待される結果

- a) この場合、実際に A で干渉が検出され、B の干渉検出器が移動されると、B からの光子は粒子として観測され、量子もつれ状態にある光子対について異なる結果が得られ、図(2)に示した実験と矛盾します。
- b) さらに、A で干渉が検出されず、B の干渉検出器も移動しない場合、もう一方の干渉検出器では干渉が発生しないため、図(1)に示した実験と矛盾します。
- c) しかし、鏡が静止衛星に設置されている場合、環境からの振動や空気の揺らぎの影響

響により、粒子が粒子検出器に到達しない状況が発生する可能性があります。そこで予備実験として、A で干渉縞が検出された場合でも、B で干渉検出器を取り外さずに実験を複数回行い、B で干渉縞が観測される確率を求める。この確率を、今回の実験で B で干渉検出器を取り外した後の粒子検出確率と比較することで、実験の正しさを検証することができる。

したがって、液晶調光フィルムを用いた干渉検出器取り外し装置を単に設置するだけでは、矛盾した結果しか得られない。実験に矛盾がなければ、図(3)に示す実験結果は、干渉検出器 B が装置の故障により取り外されていないか、その他の理由で実験が行われていないかのいずれかであると予想される。つまり、干渉検出器 B を取り外さない実験では干渉縞が観測されるが、干渉検出器を取り外そうとする実験では、光子の進路上に配置されたどちらの粒子検出器でも、未知の環境要因により粒子を検出する確率が突然ゼロになる現象が観測されることになる。複数回の実験を試みたが、いずれも検出結果が得られなかったとすれば、その原因中には、マクロの世界では統計的にあり得ない多様な現象が含まれており、このような異常現象は理由なくしては発生し得ない。つまり干渉検出器を取り除こうとしたことで、何らかの事象が発生し、異常な観測結果につながったに違いない。その事象とは、例えば、トラックの交通による振動、突然の停電、地震、大気擾乱、衛星への隕石の衝突などが考えられ、これらの事象は実験のたびに発生していると考えられる。

提案された装置では、乱数発生器またはサイコロとサイコロの面を観察するためのカメラが別途設置されており、サイコロの面が 1 以外の数字を示しているときはエレクトロクロミックフィルムが透明になる。したがって、サイコロの面が 1 を示しているときは電力が供給されず、フィルムは不透明のままで、表面に干渉縞が観測される。

11. 提案装置による期待される結果

提案装置では、乱数発生器（サイコロ）とサイコロ面の観測カメラが追加で設置される。この乱数発生器（サイコロ観測）は、サイコロが 1 以外の目を示した場合に液晶光変調フィルムが透明になるように設定されている。したがって、サイコロが 1 を示した場合は通電されず、フィルムは不透明のままで、表面に干渉縞が観測される。

この場合、実験 1 と同様に、スクリーン B に干渉縞が発生し、矛盾する結果は生じない。乱数発生器（サイコロ）が 1 以外の目を示した場合、スクリーンは透明になり、光子は透過し、粒子検出器によって光子が検出されるはずである。しかし、これは実験 2 と矛盾する結果となるため、この乱数発生器（サイコロ）には 1 以外の目は現れない。

つまり、この装置では、乱数発生器（サイコロ）の特定の数字は限られているものの、この数字が発生する確率は、乱数発生器を用いない実験で稀に発生する事象の

確率よりもはるかに高い値に設定できる。したがって、この数字が発生したために実験が実施されることはなく、矛盾が生じないことが期待される。

12. 結論

参考文献[1]の実験は、コペンハーゲン解釈ではなく多世界解釈が正しいこと、そして分岐宇宙が実際に存在することを確認し、証明している。

さらに、参考文献[1]の装置を本提案実験装置のように改良し、サイコロなどの乱数発生器を備えた干渉検出器除去装置を用いて実験を行うことで、サイコロに1のみが出現する分岐宇宙を生成できる可能性がある。これは、サイコロが1を示す確率が、ここで例示した突然の停電や大気擾乱などの事象の発生率よりもはるかに高いと考えられるためである。

13. 考察

このような物理的手法による分岐宇宙の生成が可能であることが証明されれば、人間の意識が物質に干渉できることを示唆するグローバル・コンシャスネス・プロジェクトの観測結果、特に乱数発生器を通して観測されるランダム性のパターンを説明できるかもしれない。言い換えれば、祭りなどのイベント中に乱数発生器で観測されるランダム性のパターンは、この実験におけるサイコロを用いた実験と同様に、ランダム性に偏りをもたらす分岐宇宙の生成によるものである可能性がある。人間の意識が物質に干渉するメカニズムは、論文「ミエリン鞘における量子もつれ二光子の生成」[23]に示されているように、神経組織における量子もつれの生成と利用を実証するシミュレーション結果によって明らかにされている。つまり、この実験を行っている物理学者が望む世界を選択できるという事実は、脳内の量子もつれ現象が情報伝達に寄与しているだけでなく、この実験で効果を引き起こしているのと同じメカニズムが脳の神経組織にも存在すると仮定すると、多くのイベント参加者の神経機能が、体験したい宇宙を無意識に選択している可能性があることを示唆しています。

References

- [1] Proposal for an Experiment to Confirm the Existence of Branching Universes
DOI: 10.4236/wjet.2025.132024
- [2] Random Number Generation
J. PlasmaFusionRes.Vol.96, No.6(2020) 2 9 2 - 2 9 9
- [3] Journal of International Society of Life Information Science (ISLIS)
J. Intl. Soc. Life Info. Sci. Vol.32No.2, September 2014
- [4] Contribution à l'étude de la spectrographie de Fourier par holographie (1971) ,
Alain Aspect
- [5] Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de
polarisation de photons (1983)

- [6] S. J. Freedman, J. F. Clauser, Experimental test of local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.* 28, 938–941 (1972).
- [7] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem. *Phys. Rev. Lett.* 47, 460–463 (1981).
- [8] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Phys. Rev. Lett.* 49, 91–94 (1982).
- [9] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804–1807 (1982).
- [10]. F. Jelezko, A. Volkmer, I. Popa, K. K.Rebane, and J. Wrachtrup, *Phys. Rev. A* 67, 041802 (2003).
- [11] A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein, and M. Aspelmeyer, *Nature* 433, 237 (2005). Experimental Realization of Wheeler's Delayed Choice Gedanken Experiment
DOI: 10.1126/science.1136303
- [12]. T. Aichele, U. Herzog, M. Scholtz and O. Benson, *AIP Conf. Proc.* 750, 35 (2005).
- [13]. V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, and J.-F. Roch, *Eur. Phys. J. D* 35, 561-565(2005).
- [14]. J. A. Wheeler, pp.182-213 in *Quantum Theory and Measurement*, J. A. Wheeler and W. H. Zurek edit. (Princeton University Press, 1984). See in particular Fig. 4, page 183.
- [15]. O'Brien, Jeremy L.; Zhou, Xiao-Qi; Roberto Alvarez; Lawson, Thomas; Laing, Anthony; Martín-López, Enrique (2012-11).
- [16]“Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling” (英語). *Nature Photonics* 6 (11): 773–776. doi:10.1038/nphoton.2012.259. ISSN 1749-4893.
- [17] Imaging Bell-type nonlocal behavior doi : 10.1126/sciadv.aaw2563
- [18]. 3-4 Generation and Application of Quantum-Correlated Twin Beams
KASAI Katsuyuki, ZHANG Yun, and SASAKI Masahide..
- [19] Current status of research and development for space quantum cryptography communications in NICT
Morio Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Werner Klaus, Hiroo Kunitani, Mikio Fujiwara, and Masahide Sasaki
National Institute of Information and Communications Technology (NICT), 2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

DOI:10.1109 / ICSOS.2015.7425055

[20] Harada, K., Akashi, T., Takahashi, Y., et al. (2021) Electron Interference Experiment with Optically Zero Propagation Distance for V-Shaped Double Slit. Applied Physics Express, 14, Article ID: 022006.

<https://doi.org/10.35848/1882-0786/abd91e>

[21] Tosima, K. and Harimoto, T. (2018) Simultaneous Observation of Optical-Wave and Single-Photon Interferences with a Michelson Twin Interferometer. Japanese Journal of Optics: Publication of the Optical Society of Japan 47, 8, 346-350.

[22] Aharonov, Y., Albert, D.Z. and Vaidman, L. (1988) How the Result of a Measurement of a Component of the Spin of a Spin-1/2 Particle Can Turn Out to Be 100. Physical Review Letters, 60, 1351-1354.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.60.1351>

[23] Entangled biphoton generation in the myelin sheath

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.110.024402>

4) 電子ビーム照射によるプラズマ加熱装置

Plasma Heating Device Based on Electron Beam Irradiation

DOI: 10.4236/wjet.2024.124058

Abstract

現在、大規模な装置はプラズマ加熱に不可欠です。本研究では、高電流電子ビーム応用の理論的調査に基づいて、プラズマを加熱するための新しい方法を提案します。この方法が成功すれば、従来の方法に比べて、はるかに簡単かつ安価に核融合エネルギーを生み出すことができます。この研究では、重い質量の陽イオン層を形成する粒子のラザフォード散乱を利用して、陽極（正の電位）と電場の間にプラズマ粒子を閉じ込めることによって、超高温プラズマを生成する理論的可能性を検討しました。この水素陽イオン層を形成するためには、水素ガスを閉じた容器に封入し、内部表面に絶縁体薄膜を施した負の電極に適用します。次に、高電流電子を照射することによって容器内のガスをイオン化します。

キーワード：ラザフォード散乱、ブラッグピーク、ポテンシャル解析、X線スペクトル解析、高電流電子ビーム

1. はじめに

ジュール加熱、高周波加熱、電子ビーム入射加熱 [1]-[4] は、一般的に用いられるプラズマ加熱法である。しかし、これらの方法に用いられる装置は大型で高価である。さらに、プラズマ閉じ込めに必要な磁場制御や均一な爆縮の実現など、いくつかの欠点があり、核融合発電を困難にしている。そこで本研究では、新たなプラズマ加熱法を提案する。従来の相対論的電子ビームを用いたプラズマ加熱とは異なり、提案法は磁場閉じ込めや爆縮を必要とせず、多数の陽子ビームを生成できる先進的な方法である。大電流照射された電子ビームは、容器壁の負電位によって反射され、容器内を移動する。その後、水素ガスへの電子ビーム照射によって生成された陽子は、クーロン衝突による後方散乱（ラザフォード散乱）によって、電界下で重イオン層として容器内に閉じ込められる。最後に、容器内のプラズマに高速電子を連続的に照射することで、このプラズマを高温まで加熱することができます。さらに、高温プラズマの温度は連続X線分光分析によって測定（推定）できます。さらに、装置は小型で動作電力も少ないため、現象の有無を実験的に確認することが容易です。

2. 装置概要

2.1. 実験装置の動作概要と実験の必要性

容器の外側から電子ビームを照射し、発生した陽子を容器壁の負電荷に引き寄せて絶縁体に衝突させ、フッ素樹脂を酸化します。さらに、これらのプラズマ粒子は電子ビーム照射によって加熱されます。この方法の実現可能性は実証実験によって確認できます。

電子ビームと容器壁の相互作用、プラズマの挙動、重陽イオン層の安定性をコンピュータで同時にシミュレーションすることは困難です。たとえ可能であったとしても、実機で期待通りに動作することを証明するためには、実証実験を行う必要があります。

2.2. 重陽イオン層の形成実験

まず、負電荷を帯びた密閉金属容器の内部を絶縁体フィルムで覆います。次に、容器中央に陽極管を設置し、容器内に水素ガス（または重水素ガス）を充填します。その後、容器の外部から電子ビームを磁気レンズと入射管を通して照射し、水素ガスの電離によってプラズマを生成します。

水素ガスの連続供給と電子照射により、電子速度に依存した絶縁膜中の特定の深さで陽子のエネルギーが解放される現象（ブラッグピーク）を利用して、陽子の衝突による電離により質量の大きい正イオン層が形成されます。一定時間水素ガスの供給と電離を継続することで、必要な厚さの質量の大きい正イオン層を生成できます。電子ビームは入射管中央の正電位部で加速後減速し、速度を打ち消します。また、容器壁近傍の負電位によっても減速されますが、等電位線に垂直な方向に電気力が働くため、負電位によって停止することなく容器開口部を通過できます。通過後は逆の加速力として作用するため、速度も打ち消されます。その結果、チャンバー内に入射した電子ビームはチャンバー壁の負電位によって跳ね返り続けます。余分な電子はチャンバー中央の陽極管から排出されます。さらに、入射管中央の正電位を下げることで、余剰の陽子をチャンバー外に排出することができます。

2.3. プラズマ加熱実験

少量の水素ガスを供給し、照射電子ビームの速度を、大きく重い正イオン層の形成時よりも速くすることで、生成された陽子の速度を増加させます。これらの陽子は重い正イオン層を貫通できないため、ラザフォード散乱によってチャンバー内で反跳します。この反跳過程では、陽子は軽いためほとんどエネルギーを失いません。したがって、高速電子の照射を継続することで、チャンバー内に戻ってきた高速陽子を含むプラズマを必要な高温まで加熱することができます。高電流電子ビームを連続的に照射することで、全ての水素ガスを陽子に電離させることができる。照射された電子が容器内に過剰に蓄積されると、電子は自然に陽極に引き寄せられ、容器外部に接続され

た陽極から放出される。

2.4. プラズマ加熱装置の概略構造

図1は、提案するプラズマ加熱装置の概略図を示す。中空導体(1)は密閉された容器であり、円筒状の内面を有する。この導体は負に帯電可能であり、内面および外面は絶縁膜で覆われている。管状の陽極(2)は絶縁体によって(1)内に支持されている。電子注入管(3)は負に帯電可能であり、内面は絶縁膜で覆われている。この管は(1)の内面の接線方向に延長されている。管の一端は電子の入口であり、他端は(1)の内部に接続されている。注入管の直径は電子ビームの電流値によって決定される。水素ガスはタンク(4)から供給管(41)および(2)を介して(1)内に供給される。真空容器(5)は必要な真空を維持するために真空ポンプ(51)に接続され、その内部は注入管(3)の一端に接続されている。電子銃(6)は、入口から電子ビームを(5)の内部を通して(1)内に入射する。電子ビームは(1)の負に帯電した内壁で反射される。反射された電子は、(4)から(1)内に供給されたガスをプラズマ化する。(1)を覆う冷却装置(7)には水路が設けられている。水流は熱交換器内を循環するため、水圧を制御することができる。電子銃としては、真空加熱銃などの市販の電子銃を使用することができる。

提案装置は、真空チャンバーから放出されるX線を観測するためのX線分光計と、タンクから供給管に供給されるガスの流量を制御するためのガス流量調整器を備えている。

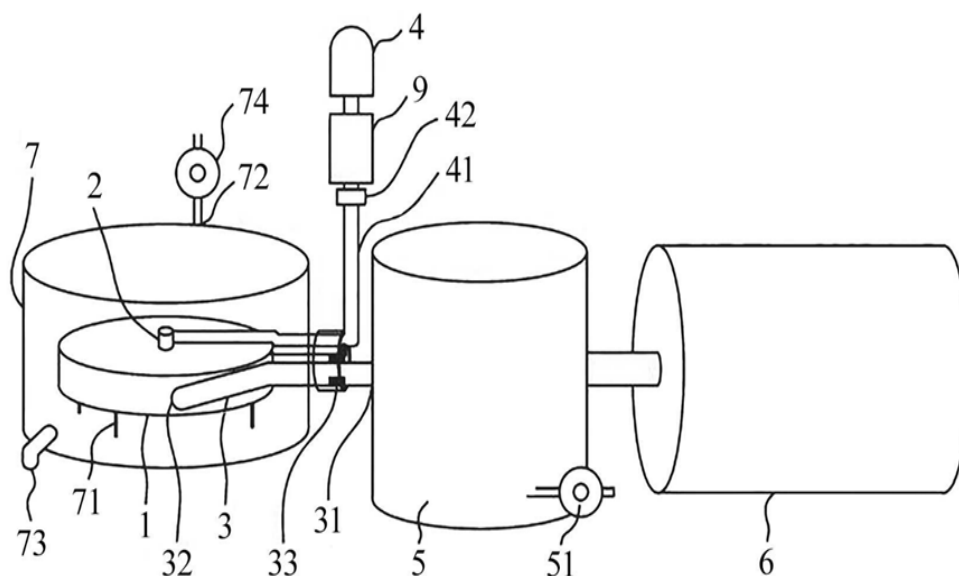


Figure 1. プラズマ加熱装置の3次元図

3. 絶縁膜における大規模かつ重い正イオン層の形成における物理

水素ガスは密閉容器に導入され、電子ビームの照射を受けるとプラズマ化し、容器外へ脱出しようとし、しかし、密閉容器内部は中央に配置された陽極によって負に帯電しており、陰極に相当する内面は、入射管の微小な部分を含め、絶縁膜（強誘電体）で覆われています。そのため、プラズマ化されたガス中の陽子などの軽い正イオンは陰極に引き寄せられ、絶縁膜内部へ侵入します。しかし、これらのイオンは速度に応じた飛行距離で停止し、エネルギーを放出してブラッグピークを生じます。こうして、絶縁基板はブラッグピーク付近で強く電離し、二次電子が放出されます。

したがって、供給ガス量が十分であれば、低電圧での電子ビーム照射によって絶縁膜の浅い領域に正イオン層を生成できる。これは、密閉容器の負電界によって二次電子が絶縁膜から脱出し、正イオンが絶縁膜に引き寄せられて表面付近に留まることを示唆している。生成された正イオン層は電界に対する遮蔽効果を発揮する。しかし、密閉容器の壁に高電圧の負電界を印加することで、電子ビームが絶縁膜に到達できず、絶縁膜の加熱を防ぐことができる。さらに、水素ガスのプラズマ化によって生成された陽子などの軽正イオンが絶縁膜に侵入するため、密閉容器内には電子のみが残留する。余剰電子は最終的に陽極に吸収され、装置外に排出される。

先行研究[5][6]では、陽子線照射によってフッ素樹脂に正電荷が蓄積され、この蓄積現象が相当長時間持続することが報告されている。したがって、チャンバー内の水素ガスの電離によって発生した陽子が密閉チャンバー壁の負電位に引き寄せられ、フッ素樹脂に衝突すると、重い正イオン層が形成されることは間違いない。

3.1 陽子線の飛程

ブラッグ・クリーマン則に基づき、空気中における α 線の飛程は次式で表されます。

$$R=0.318E^{3/2}$$

ここで、 R は飛程（cm）、 E は α 線のエネルギー（MeV）を表します。固体の場合、飛程 R は次式で表されます。

$$R=\rho_0/\rho (A/A_0)^{1/2} \times R_0$$

ここで、 ρ_0 と ρ は物質の密度、 A_0 と A は物質の質量数、 R_0 と R はそれぞれ空気と固体の飛程を表します。式（2）から、フッ素樹脂中における α 線の飛程を求めることができます。

フッ素樹脂の密度は電離度が増加するほど低下するため、密度が低い場合、飛程はさらに長くなります。

4. 電気力によるプラズマの閉じ込めが可能であることの検証（電位・電界解析）

図2はプラズマ加熱装置の断面図を示し、図3と図4はプラズマ加熱装置の模式図を示しています。さらに、図3と図4は電位解析から得られた結果の例を示しており、2.1節で述べたように、重陽イオン層の形成過程において、電子ビームが負に帯電した円筒状の密閉容器の内壁で反跳することを示しています。

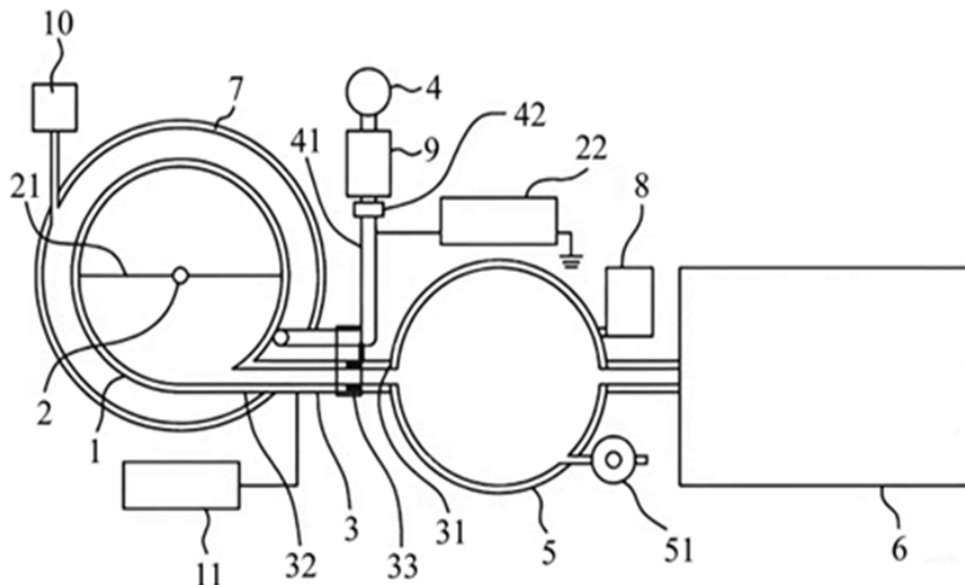


Figure 2. 提案されたプラズマ加熱装置の断面

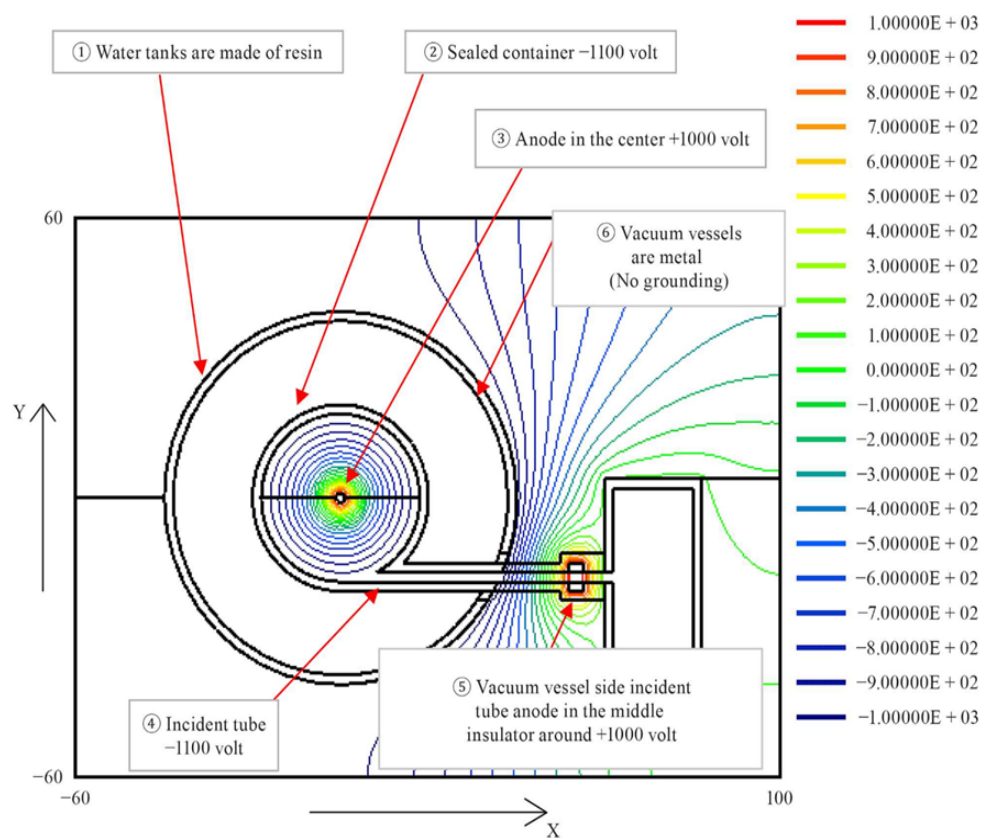


Figure 3. 電位解析の断面図

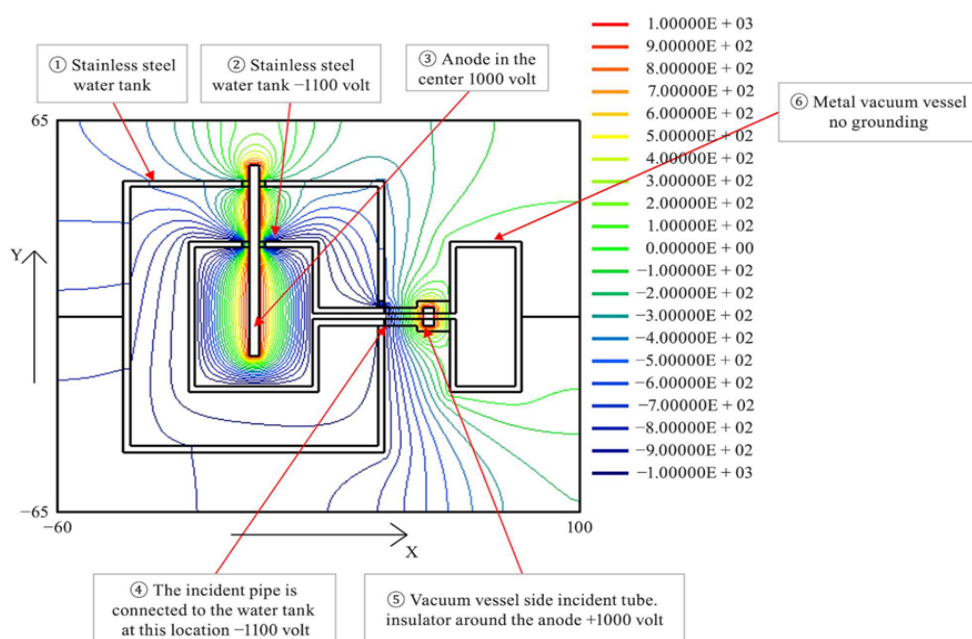


Figure 4. 電位解析の縦断面。

電子ビームは、入射管を通してチャンバー内壁（図 3 の断面図）に接線方向から入射し、壁の負電位によって反射される。

図 3 および図 4 は、1keV 電子ビームが壁に衝突するのを防ぐため、密閉型チャンバーの壁全体が負に帯電していることを示す。さらに、電子ビーム入射管の入口には電位が発生していないため、電子ビームは入射管中央の正電位領域で加速されるが、管通過後に減速されるため、電子ビーム速度は低下する。電子ビームは密閉チャンバーとの接続部で減速されるが、等電位線はビーム入射方向に対して約 45° の角度をなしているため、等電位線に対して垂直に働く。そのため、電子ビームは密閉チャンバーの電位に遮られることなくチャンバー内に入射することができる。この部分を通過すると、負電位は逆に加速力として作用する。

電位解析に用いる電子ビームの電流値および加速電圧は、それぞれ 500 mA および 1 keV と仮定する。また、照射は長時間連続的に行われるものと仮定する。重陽イオン生成過程においては、半径 2 cm、長さ 5 cm（容積：62.8 cm³）の密閉型チャンバーに -1100 V を印加する。すなわち、陽極電位は 1000 V と仮定する。

炭素原子およびフッ素原子の第一イオン化電位は、それぞれ 1086.5 kJ/mol および 1681.0 kJ/mol である。水素ガスのイオン化エネルギーは 2842 kJ/mol（1312 kJ \times 2 + 218 kJ（基底状態原子化））である。

前述のデータから、水素ガスを段階的に供給した場合でも、500W の電子ビーム照射で総量 1 気圧に相当する水素ガスをイオン化するには 16 秒かかることがわかります。さらに、500W の電子ビーム照射ですべての水素プラズマを 1keV まで加熱するには 18 分かかります。さらに長い時間が必要になりますが、十分に長い照射時間があればフッ素樹脂へのイオン化層の形成は可能です。

クーロン衝突計算の結果、重陽イオン層の形成には 6740 層以上が必要であることが示されました。しかし、フッ素樹脂の C-F 結合長は 1.3Å と短いため、重陽イオン層の形成に必要な膜厚は約 1 μ m です。

本論文で想定する陽子ビームの飛程は 6Å と短いため、フッ素樹脂の電離により発生した重い正イオンは、陽子ビームの入射に伴い、絶縁膜表面付近で正イオンとして形成される。さらに、重正イオンと衝突しない位置で入射した陽子ビームは、前方ラザフォード散乱により大きな運動エネルギーを失うことなく深部領域

に到達する。この深部領域で停止した重正イオンは、電離エネルギーを放出することでフッ素樹脂を次々に電離し、重正イオンに変換する。これらの過程により、フッ素樹脂の密度が低下するため、飛程は長くなる。さらに、照射する電子ビームの速度を上昇させることで陽子ビームの速度を 1keV から徐々に上昇させていくことで、飛程を延長することができる。

したがって、約 6740 層が形成されると、ラザフォード後方散乱により陽子ビームはより深い領域に侵入することができなくなります。

提案された装置で生成される重い正イオンは、負に帯電したチャンバーの壁に引き寄せられ、絶縁膜の表面付近に留まります。

4.2. 電界解析結果

図 5 は、2.2 節で説明したプラズマ加熱プロセスによって、密閉容器内の水素プラズマがどのようにして必要な高温まで加熱されるかを示す電界解析チャートです。密閉容器内に閉じ込められた陽子に 10keV の高速電子ビームを連続的に照射することで熱平衡が達成されるため、水素プラズマは加熱されます。縦軸と横軸は、それぞれ陰極と陽極間の電圧と位置を示しています。

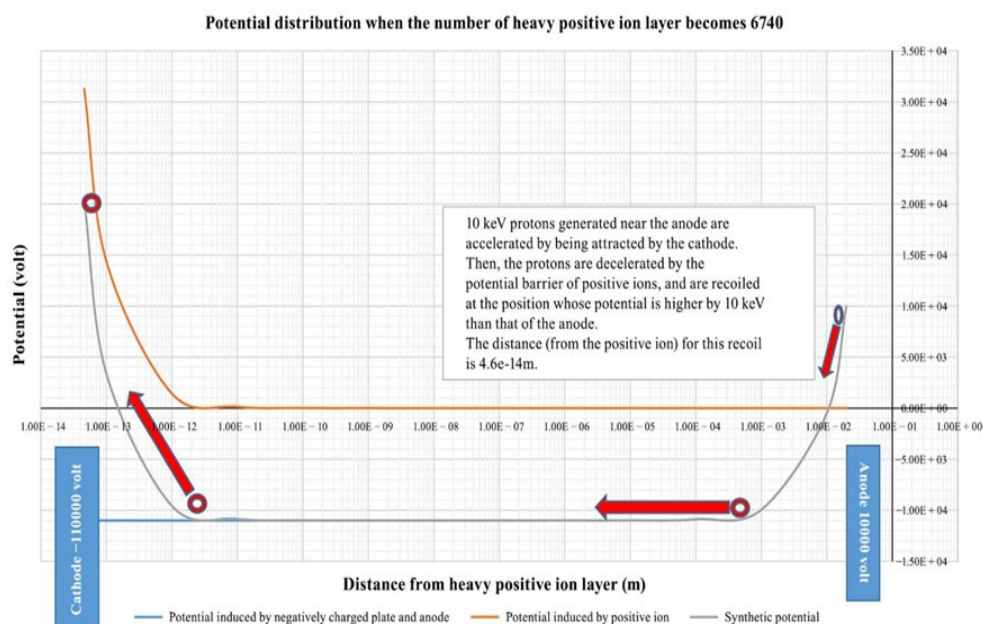


Figure 5. 電界解析のチャート

電位解析（図 5）に示すように、10,000V の正電位部を電子注入管に設置し、10,000V を超える電圧を密閉チャンバーに印加すると仮定します。これらの印加

電位により、密閉チャンバー内の陽子は電子注入管から逃げることはありません。

4.3. クーロン衝突

クーロンの法則によれば、2つの荷電粒子間に働く力は距離の2乗に反比例する。したがって、絶縁膜中に形成された正イオンに近づく陽子は、近づくにつれて強い斥力を受ける。したがって、重陽イオン膜が十分に厚い場合、膜に照射された陽子イオンは、イオン層の重なりにより、最終的に陽イオンの1つによる後方散乱に対応する角度で衝突し、反跳する。衝突直径 b は、式 $b = Ze^2 / 4\pi \epsilon_0 m v^2$ から計算される。[7]; 陽子のような1価イオンの場合、後方散乱は $b = 72 \text{ fm}$ 以下で発生する。正イオン層の数が6740の場合、イオン間の距離を約46 fmと推定すると、飛行中の陽子の平均衝突直径 b は約23 fmと計算されます。つまり、陽子は正イオンと衝突して後方散乱されます。したがって、このような重い正イオン層は、クーロン衝突によって陽子を反射する壁とみなすことができます。

5. 実証実験装置の製作可能性の検討

本装置の製作可能性を調査するため、以下の条件を想定した。チャンバーは密閉型であり、内面はフッ素樹脂で覆われている。チャンバーの直径と長さはそれぞれ2cmと4cmである。1/10万気圧の水素ガスを密閉チャンバー内に封じ込め、10keVの電子ビーム照射によって加熱する。これらの実験条件から、以下のパラメータを算出・推定した。プラズマ加熱過程においては、電子ビームは50mA、10keVに設定し、照射は連続的に行うものとした。

5.1. プラズマ圧力

平均エネルギー1eVの粒子群の温度は、 $1\text{eV} = 3/2 kT$ の関係に基づき、7740 Kに相当する。したがって、10 keV粒子の温度は $7.7 \times 10^6 \text{ K}$ に相当します。ボイル・シャルルの法則に基づくと、圧力は $7.7 \times 10^6 \text{ K} \div 300 \text{ K} \div 100,000$ で約2.6気圧となります。チャンバー外の水圧を制御することで、高圧になっても損傷しないチャンバーを実現できます。

5.2. チャンバーの発熱量

ビーム出力は $50 \text{ mA} \times 10 \text{ keV} = 500 \text{ W}$ であるため、ビームエネルギーがすべて熱に変換されたとしても、 $1 \text{ ca} = 4.2 \text{ J}$ という関係から、119 ca/sの発熱量となります。したがって、チャンバー外の水流量を100 cc/sと仮定すると、水温の上昇はわずか1.2°Cにとどまると予想されます。

衝突によって絶縁膜に伝達された陽子の運動量は、密閉型チャンバーの周囲を流れる水に熱として伝達され、装置外に排出される。

5.3. 制動放射線による放射損失

制動放射線による放射損失は密度の低下とともに減少するため、ガス体積が水の体積の 1.8×10^9 倍になると約 10 W となる。したがって、想定される条件下では放射損失は無視でき、入力電力はかなり大きくなる[8]。

5.4. 絶縁膜の性能

フッ素樹脂であるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) の絶縁耐力、断熱性、熱伝導率はそれぞれ 19 kV/mm、260°C、0.23 W/m-K である。したがって、電子ビームの電流値と電圧値を制御することで、絶縁破壊や熱破壊を起こさずに使用することができる。

6. プラズマ温度の測定

密閉型チャンバー内のプラズマ温度が上昇すると、制動放射線によって X 線が発生し、電子ビーム入射管から放出される。このような電磁放射線はプラズマのエネルギー損失を引き起こす。しかし、チャンバー外部から X 線カメラを用いて X 線スペクトルを観測すると、連続スペクトルの形状からプラズマ温度を測定（推定）することができる[9]。

7. 結論

実験の実現可能性を多角的に検討した結果、プラズマを電気力でチャンバー内に閉じ込め、電子ビーム照射によって加熱する実験は可能と考えられ、本実証実験によって新しいプラズマ加熱法の成否を確認することができる。この方法は、従来のプラズマ加熱法よりも大幅に低コストで高温加熱を行うことができる。したがって、本研究が、本方法の実現可能性を実証する実験を通して、本研究の更なる発展を目指す研究者に引き継がれることを期待する。さらに、今後の研究によって提案法が実験的に検証されることが期待され、本研究は、本研究をさらに発展させようとする研究者にとって参考となるであろう。

References

- [1] Sato, H. (1987) Plasma Generation Method Morphology. Electrical Conference Magazine, 107, Article 1101.

- [2] Hammer, D.A., Gerber, K.A. and Ali, A.W. (1979) Beam-Plasma Heating Model. IEEE Transactions on Plasma Science, 7, 83-93.
<https://doi.org/10.1109/tps.1979.4317200>
- [3] Intelligible Seminar on Fusion Reactors (3) Heating Systems to achieve Fusion Reaction in High Temperature Plasma.
- [4] Welch, D.R., et al. (2021) Dynamics of the Super Pinch Electron Beam and Fusion Energy Perspective. Journal of the Japan Atomic Energy Society, 33, Article 120401.
- [5] Ushio, U.C., Kaisei, E.E., Hiroaki M., et al. (2018) Link: Irradiated by a Proton Molecular Structure Analysis in Fluorine-Based Insulating Material Irradiated by a Proton, Published by Japan Aerospace Exploration Agency. The 15th Space Environment Symposium, Sendai, 30 October 2018, 143.
- [6] Miyoshi, M., Hijikata, K., Miyake, H. and Tanaka, Y. (2017) Charge Accumulation Characteristics of Fluorine Insulating Materials under Electron Beam Irradiation. 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, 11-15 September 2017, 508-511.
<https://doi.org/10.23919/ISEIM.2017.8166538>
- [7] Collision Process in Plasma.
https://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/~takase/plasma_3.pdf
- [8] Makoto, Y. (2018) Calculation of Bremsstrahlung Heat from Heavy Water.
- [9] Naomi, K. (2013) Temperature Properties of High-Temperature Plasma in the Center of Galaxy Cluster. Master's Thesis, Hiroshima University.

4) 核融合発電の実現に向けた課題と解決策の提案

要旨

現在、核融合発電研究は発電に至るまでに様々な課題に直面しています。そこで我々は、米国特許（特許番号 11800628）を取得した電子ビーム照射による新しいプラズマ加熱装置（プラズマ加熱装置）の改良を目指します。この装置は、水素ガスを電離させ、陽子との衝突により絶縁膜上に重陽イオン層を生成し、その陽イオンによるラザフォード散乱を利用してプラズマをチャンバー内に閉じ込めることでプラズマを加熱します。電子ビームを連続的に照射することでプラズマを必要な高温まで加熱し、D-D 反応核融合反応を可能にします。その後、発生した熱はチャンバー周囲の水流に吸収され、高温高压の熱水で駆動される蒸気タービンによって発電が可能になります。そこで、この装置を用いた発電実験を行うことを提案します。この新しい装置が完成し、実験検証によってその動作が検証されれば、核融合発電が直面する様々な課題を解決し、将来の核融合発電の実現に大きく貢献することが期待されます。本稿では、この新しい装置の概要、動作、そして具体的な効果について紹介し、核融合研究の発展に貢献することを期待します。

キーワード：水素ガスの電離、絶縁膜、ラザフォード散乱、プラズマ加熱、D-D 反応核融合

はじめに

核融合発電は究極のエネルギー対策として研究が進められています。しかしながら、未だ解決すべき課題は数多く残されています。例えば、以下の点が挙げられます。

- (1) プラズマ制御
- (2) トリチウムの取得と管理
- (3) 高温高密度環境の維持
- (4) エネルギー回収効率の向上
- (5) 高安全炉壁
- (6) 核融合単価とコスト
- (7) 発生する中性子線の遮蔽

これらの課題を解決するため、我々はこれまでにない新しいタイプの核融合炉を提案します。

2. プラズマ加熱装置の概略構造

図 1 は、提案するプラズマ加熱装置の概略図である。図 1 および図 2 に示すように、中空導体(1)は密閉された円筒状の内面を有する。この導体は負に帯電可能で

あり、その内外面は絶縁膜で覆われている。管状の陽極(2)は、(1)内に絶縁材料によって支持されている。電子注入管(3)は負に帯電可能であり、その内面は絶縁膜で覆われている。この管は(1)の内面の接線方向に延長されている。管の一端は電子の入口であり、他端は(1)の内部に接続されている。注入管の直径は、電子ビームの電流値によって決定される。水素ガスは、タンク(4)から供給管(41)および(2)を介して(1)内に供給される。真空チャンバー(5)は、必要な真空を維持するための真空ポンプ(51)に接続され、その内部は注入管(3)の一端に接続されている。電子銃(6)は、入口から電子ビームを(5)の内部を通して(1)内に注入する。電子ビームは(1)の負に帯電した内壁で反射される。その後、反射電子は(4)から(1)内に供給されたガスをプラズマに変換する。(1)を覆う冷却装置(7)には水路が設けられている。水流は熱交換器内を循環するため、水压を制御することができる。電子銃は、真空加熱銃などの市販のものを使用することができる。

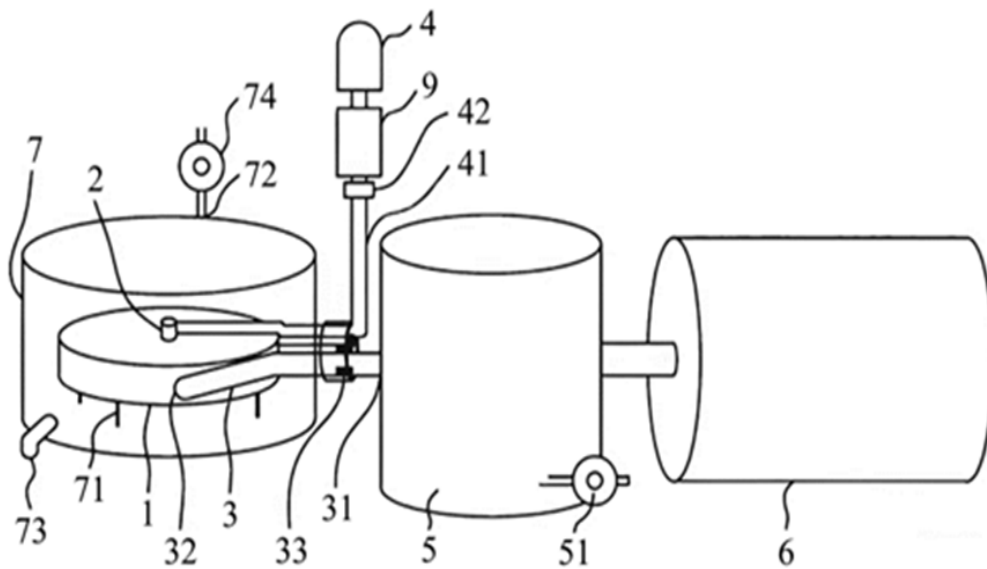


Figure 1. Three-dimensional view of the plasma heating device.

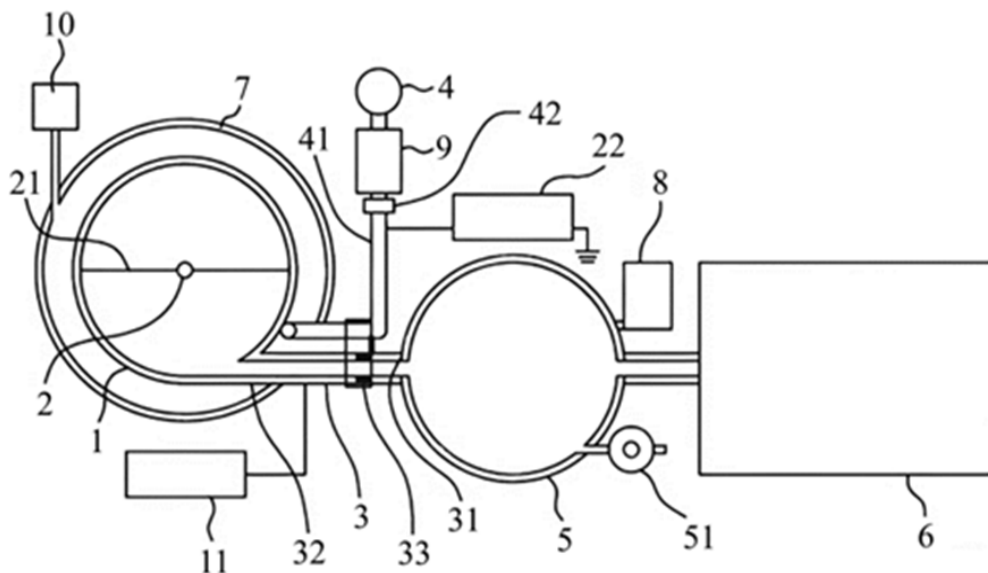


Figure 2. Cross-section of the proposed plasma heating device.

3. 新システムの動作概要

水素または重水素ガスを気密容器に封入し、内面に絶縁膜を貼付した金属容器に導入する。容器の外側から高電流電子を照射することで、ガスをイオン化する[1-3]。

電子線は容器壁の負電位で反射され、容器内を移動する。続いて、水素ガスへの電子線照射によって発生した陽子[4]がフッ素樹脂絶縁膜を透過し、これを酸化することで、浅い部分に正イオン層を形成する[5,6]。

その結果、陽子と重水素は、電界の影響下にある重イオン層とのクーロン衝突による後方散乱（ラザフォード散乱）によって偏向する[7]。さらに、容器中央の陽極に向かって反射され、そこで効果的に捕捉される。

最後に、高速電子をプラズマに連続照射することで、プラズマを高温に加熱することができ[8]、その温度はX線スペクトル分析によって推定することができる[9]。

4. 新システムの効果

燃料として重水素ガスを用いる場合、重水素ガスは磁気閉じ込めを必要とせず、電気力のみで閉じ込められるため、プラズマ制御やトリチウムの取得・管理は不要である。さらに、プラズマ温度は高速電子ビームの速度によって、プラズマ密度は容器内に閉じ込められた重水素ガスの密度によって決定されるため、(3)電子ビームの連続照射によって高温・高密度を維持できる。

5. 新方式による発電

照射する電子ビームの速度を高め、プラズマ温度を核融合に必要な温度に設定すると、核融合が起こります。しかし、その熱は容器を取り囲み循環する水を温め、蒸

気タービンを作動させて発電します。

そのため、容器内外のプラズマ圧力と水圧力が同程度に調整され、容器壁が薄くても損傷しない(5)ため、安全性の高い炉壁を実現しています。(4)エネルギー回収効率はタービンとほぼ同等です。

この装置には複雑な電力・トリチウム生成機構がないため、(6)単価・コストが低く抑えられます。

6. D-D 反応核融合

D-D 反応核融合は現在も研究が進められていますが、従来の設計を改良した新型装置で実現できれば、発生する中性子線は D-T 反応核融合よりも少ないだけでなく、構造が水の層で囲まれるため、中性子線の漏洩がさらに少なくなります。これにより、発生する中性子線の遮蔽が容易になります[7]。

7. 装置の実現可能性

プラズマ加熱装置[10]を以下のように改造し、D-D 反応核融合が可能なプラズマ加熱・発電実験を行う。

容器内に少量の重水素ガスを供給し、照射電子ビームの速度を重陽イオン層形成時よりも速くすることで、発生する陽子の速度が増加する。陽イオンは重陽イオン層を透過できないため、ラザフォード散乱により容器内で跳ね返る。この跳ね返り過程で陽イオンは軽いいためエネルギーをほとんど失わない。そこで、電子銃を改良し、予想よりも速い速度で電子を照射し続けることで、容器内に戻る高速陽イオンを含むプラズマを D-D 反応核融合に必要な高温まで加熱することができる。特に、照射された電子が容器内に過剰に蓄積されると、自然に陽極に引き寄せられ、容器外部に接続された陽極から放出されます。この核融合反応によって発生する熱によって発電が可能になります。

D-D 反応核融合を実現するために、容器内に重水素ガスを供給し、高速電子ビームを照射します。100 keV の電子ビームを使用する場合、電子ビームが容器に到達する前に跳ね返るように、容器壁と導入管には 100 kV を超える負電位が印加されます。容器中央の陽極管の正電位は+100 kV を超える必要があります。この間、プラズマから発生する X 線は、真空容器に取り付けられたベリリウム窓を通して常時観測されます (5)。D-D 反応の発生によりプラズマ温度が照射電子ビーム温度を超え、過熱による装置損傷の恐れがある場合には、入口管の正電位の電圧を下げて D-D 反応核融合に必要な陽イオンを放出することで容器の損傷を防止します。

さらに、容器内面を覆う絶縁膜は、異なる成分の二層構造となっています。この新しい実験装置を用いることで、D-D 反応核融合が理論的に可能となり、その効果を実験で確認することができます。

容器内面を覆う膜は、厚さ 1mm の高熱伝導率窒化アルミニウム (AlN) 膜を、厚さ 10 μm のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) フィルムと金属容器の間に積層した

もので、発熱による熱破壊を防止します。AlN の熱伝導率は $170\text{W/m}\cdot\text{K}$ (25°C) であり、絶縁強度は 15kV/mm 以上です。そのため、電子ビームの電流と電圧を制御することで、絶縁破壊や熱破壊を起こすことなく使用することができます。核融合反応が自己着火すると、発生するエネルギーによって電子ビームを照射する必要がなくなり、金属容器への印加電圧を低減できます。

8. 自己着火条件の達成

プラズマ温度は高速電子ビームによって決定され、プラズマ密度は重水素ガスの密度によって決定されます。核融合反応の自己着火条件は、プラズマ温度、プラズマ密度、および閉じ込め時間の積によって決定されます。電子ビームの照射を継続すると、プラズマ温度は電子ビームと熱平衡に達します。 100keV の電子ビーム照射では、プラズマ温度は $7.7 \times 10^8\text{K}$ になります。 21°C 、 $1/1,000,000$ 気圧では、水素と重水素のガス密度は $0.00004143\text{ mol/m}^3$ であり、これは重水素プラズマ密度約 $5 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ に相当します。電子ビームを連続的に照射することで、閉じ込め時間を最大限に延ばし、その積を最大化することができます。 100 keV 電子ビームを約 20 秒間照射すると、プラズマ密度と閉じ込め時間の積 ($n\tau$) は $10^{21}\text{ m}^{-3}\text{s}$ に達し、元島ら[11]の図 1 に示すように、自己点火による D-D 反応核融合が達成可能となる。

9. D-D 反応核融合炉の予想発生熱量と発生エネルギーの推定

重水素 (D) 原子核間の核融合反応は、 $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{He} + \text{n} + 3.27\text{ MeV}$ (D-D 反応 1) および $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{p} + 4.03\text{ MeV}$ (D-D 反応 2) と表される。これら 2 つの核融合反応は、同じ相対運動エネルギー (反応断面積) に対してほぼ同じ確率で起こる。生成されたトリチウム (T) またはヘリウム (He) も、核融合反応を起こします。 $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He} + \text{n} + 17.6\text{ MeV}$ (DT 反応) および $\text{D} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{p} + 18.3\text{ MeV}$ です。半径 20cm 、長さ 5cm の容器の容積は $6,280\text{cm}^3$ 、 $1/1,000,000$ 気圧における重水素ガスのモル数は $3.14 \times 10^{-7}\text{ mol}$ です。この容器内で核融合反応によって発生する熱は約 $1,840\text{ kJ}$ です。

10. 実験装置の運転と発電

前述の通り、高さ 5cm 、半径 20cm の円筒形容器を核融合炉として用いた。重イオン層を生成した後、 $6,280\text{cm}^3$ の容積に 1 気圧の 100 万分の 1 に相当する 3.14×10^{-7} モルの重水素ガスを容器内に注入し、核融合反応を行う。 5mA 、 100keV の電子ビームを照射することで、D-D 反応核融合反応が生じた。装置の発熱を防ぐため、X 線カメラで X 線スペクトルを観察しながら、電子ビーム電流を 5mA から徐々に下げる。約 20 秒間照射を続け、自己着火状態に達した場合は電子ビーム照射を停止する。続いて、反応を継続させるため、毎秒 3.14×10^{-8} モルの重水素ガスを容器内に注入する。この際に発生した熱エネルギーは 184 kJ であったが、この熱で核融

合発電を継続させるために、電子ビーム照射管の正電位を調整し、燃料ガス注入と同時に核融合反応後に発生した余剰プラズマ（ヘリウムイオン）を容器外に排出する。

また、容器壁温度を約 200°C に保つため、容器周囲の純水の流量と水压を調整し、水温を 200°C に保つ。この高圧高温水を用いて蒸気タービンを運転し発電する。このプロセス全体の発電効率を 30% と仮定すると、この実験用核融合発電装置の出力は 55.2 kW となる。蒸気タービン運転後の蒸気は海水を用いて冷却され、流水として再び容器内を循環させる。

11. AlN 膜の使用効果

容器内部を覆う膜として、高熱伝導率を有する厚さ 1mm の AlN 膜を、厚さ $10\mu\text{m}$ の PTFE 膜と金属容器の間に積層することで、発熱による熱破壊を防止する。AlN の熱伝導率は $170\text{W/m}\cdot\text{K}$ (25°C) であり、絶縁強度は 15kV/mm 以上であった。そのため、電子ビームの電流値と電圧値を制御することで、絶縁破壊や熱破壊を起こさずに使用することができる。核融合反応が自己着火すると、発生したエネルギーによって電子ビームを照射する必要がなくなり、金属容器への印加電圧を低減することができる。

12. 結論

多角的な観点から実験の実現可能性を評価した後、電気力と電子ビーム照射による加熱を用いてチャンバー内にプラズマを閉じ込める実験を行いました。この新しいプラズマ加熱法の成否は、この実験によって確認することができます。この手法は、従来のプラズマ加熱法と比較して、大幅に低コストで高温加熱を可能にする [11-13]。したがって、本研究は、実験を通して本手法の更なる発展を目指す更なる研究の指針となる。あるいは、実験装置を製作し、D-D 反応核融合が起こる条件下で電子ビーム照射・発電実験を行うことで、核融合発電の実現可能性を確認し、核融合研究に新たな段階をもたらすことが期待される。

References

- [1] Sato K, III 1987 Plasma generation method IEEJ. 107 1101–1106 (doi: 10.11526/ieejjournal1888.107.11_1101)
- [2] Hammer DA, Gerber KA and Ali AW 1979 Beam-plasma heating model IEEE Trans. Plasma Sci. 7 83–93)
- [3] Inoue T and Sakamoto K 2005 Mechanism of a nuclear fusion reactor, J. Nucl. Sci. Technol. 47 120–127 (doi: 10.3327/jaesj.47.120)
- [4] Welch DR, Rose DV, Novikov DV, Weller ME, Esaulov AA and Miley GH 2021 Dynamics of superpinch electron beams and fusion energy

perspective Phys. Rev. Accel. Beams. 24 120401 (doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120401)

[5] Ushio UC, Kaisei EE and Hiroaki M 2018 Inhibited by a proton molecular structure analysis in fluorine-based insulating material irradiating by a proton 15th Space Environment Symposium, the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (Sendai) p 143.

[6] Miyoshi M, Hijikata K, Miyake H and Tanaka Y 2019 Charge accumulation characteristics of fluorine insulating materials under electron beam irradiation IEEJ Trans. Fund. Mater. 139 113–118 (doi: 10.23919/ISEIM.2017.8166538)

[7] Collision processes in plasma. https://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/~takase/plasma_3.pdf, nd.

[8] Makoto Y 2018 Calculation of Braking Radiant Heat From Heavy Water <https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ebisawa/TEACHING/2014Niigata.pdf>

[9] Naomi K 2013 Temperature properties of high-temperature plasma in the center of galaxy cluster Master's Thesis Hiroshima University, Hiroshima

[10] Yasukagawa M 2024 Plasma heating device based on electron beam irradiation World J. Eng. Technol. 12 952–962 (doi: 0.4236/wjet.2024.124058)

[11] Motojima O, Ohnishi M, Iiyoshi A 1977 A proposal to attain the D-D ignition Kakuyūgō kenkyū 38 205–223. (doi: 10.1585/jspf1958.38.205)

[12] Yasukagawa M 2024 Plasma heating device based on electron beam irradiation World J. Eng. Technol. 12 952–962 (doi: 0.4236/wjet.2024.124058)

[13] Kamada Y 2017 Recent status of fusion research and development Radioisotopes 66 181–200 (doi: 10.3769/radioisotopes.66.181)

[14] Kiyoshi Y, Yasushi Y, Kai M, Hisayuki T, Teruhisa T, Eiki H, Kunihiro Y, Masami O, Hodaka O, Seiji S, Tsuyoshi M, Yoshiyuki T, Ken T and Yoshikazu K 2007 Current status of inertial-electrostatic confinement fusion study J. Plasma Fusion Res. 83 795–811 (https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2007_10/jspf2007_10-795.pdf)

本書出版の背景

私は特定の分野の専門家でもなければ、研究機関にも所属していません。むしろそれが幸いとなり、物理学に関わる幅広い知識に興味を持ち、それらの知識を組み合わせることで、従来の常識を覆す論文を書くことができたと考えています。しかしながら、このような型破りな論文を掲載するジャーナルは少なく、査読段階に至る前に、論文内容の論理的矛盾以外の様々な理由でジャーナル編集者からリジェクトされることも少なくありません。それでも、論文の価値を常識ではなく論理的な正しさで判断する人は必ずいると考え、本書を出版しました。本書が、皆様の科学的真理への理解を深める一助となれば幸いです。