

Determinación del cambio de masa de dispositivos de almacenamiento digital mediante simulación en MATLAB aplicando la ecuación $E = mc^2$

Determination of Mass Change in Digital Storage Devices through MATLAB Simulation Using the Equation $E = mc^2$

Anselmo Chávez-López ^a

Recibido: 19 de diciembre de 2024.

Aceptado: 9 de abril de 2025.

^a Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: anselmochl@tuian.mx | ORCID:
[0000-0002-6810-280X](https://orcid.org/0000-0002-6810-280X)

Cómo citar:

Chávez-López, A. (2025). Determinación del cambio de masa de dispositivos de almacenamiento digital mediante simulación en MATLAB aplicando la ecuación $E = mc^2$. *UVserva*, (20), 168-176.
<https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3070>

Resumen: Este estudio explora la relación teórica entre la energía consumida en el almacenamiento de datos en dispositivos digitales, como memorias USB, y el cambio de masa asociado según la ecuación de Einstein $E = mc^2$. Aunque los datos digitales no tienen peso significativo en términos prácticos, el proceso de escritura implica energía que, en teoría, podría traducirse en un cambio de masa minúsculo. Mediante un modelo matemático y simulaciones en MATLAB, se estima que este cambio es del orden de femtogramas, una magnitud no detectable con la tecnología actual. Los resultados resaltan la aplicabilidad de la relatividad a sistemas tecnológicos y sugieren implicaciones para nanotecnología y metrología de precisión, a pesar de su limitada relevancia práctica inmediata.

Palabras clave: Energía; masa; memoria USB; relatividad; simulación.

Abstract: *This study explores the theoretical relationship between the energy consumed in data storage on digital devices, such as USB drives, and the associated mass change according to Einstein's equation $E = mc^2$. Although digital data does not have significant weight in practical terms, the writing process involves energy that, in theory, could translate into a minuscule mass change. Using a mathematical model and MATLAB simulations, this change is estimated to be about femtograms, a magnitude undetectable with current technology. The results highlight the applicability of relativity to technological systems and suggest implications for nanotechnology and precision metrology, despite their limited immediate practical relevance.*

Keywords: *Energy; Mass; USB Drive; Relativity; Simulation.*

Introducción

La ecuación de Einstein $E = mc^2$ establece que la energía y la masa son equivalentes, de modo que cualquier cambio energético en un sistema implica un cambio proporcional en su masa (Einstein, 1905). Este principio, fundamental en la física moderna, ha sido ampliamente validado en fenómenos de alta energía, como las reacciones nucleares y la conversión de masa en energía en procesos como la fisión y la fusión (Cohen *et al.*, 2019; Nakamura *et al.*, 2020). Sin embargo, su aplicación a sistemas cotidianos, como los dispositivos de almacenamiento digital, plantea un desafío conceptual debido a la escala diminuta de los efectos involucrados.

Las memorias USB almacenan datos mediante estados eléctricos en celdas de memoria, un proceso que requiere energía para cambiar bits de 0 a 1 o viceversa. Teóricamente, esta energía podría traducirse en un incremento de masa, pero su magnitud es tan pequeña que no afecta el peso perceptible del dispositivo.

En términos prácticos, el peso de una memoria USB permanece constante independientemente de su contenido, ya que los bytes no poseen masa tangible directa. Sin embargo, desde una perspectiva relativista y termodinámica, el consumo energético

del almacenamiento sugiere un cambio de masa que, aunque insignificante en la vida diaria, merece exploración teórica.

Este estudio propone un modelo matemático para cuantificar dicho cambio y lo valida mediante simulaciones computacionales, destacando su relevancia conceptual más allá de las limitaciones actuales de medición.

Con este propósito, se busca determinar teóricamente el cambio de masa asociado a la energía consumida en memorias USB mediante simulaciones en MATLAB, validar el modelo analizando la magnitud de los cambios en función de la capacidad de almacenamiento, y evaluar las implicaciones teóricas para aplicaciones futuras en nanotecnología y metrología, contribuyendo así al entendimiento de cómo la relatividad puede aplicarse a tecnologías modernas.

1. Revisión de literatura

La equivalencia energía-masa, propuesta por Einstein, establece que la energía (E) y la masa (m) están relacionadas mediante la ecuación $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) (Einstein, 1905).

Esta ecuación, derivada de la teoría de la relatividad especial, implica que cualquier incremento de energía en un sistema se traduce en un aumento de masa proporcional, con c^2 (9×10^{16} m²/s²) como factor de conversión (Taylor & Wheeler, 1992).

En contextos de alta energía, como reacciones nucleares, este principio ha sido ampliamente verificado, pero su aplicación a sistemas tecnológicos cotidianos, como los dispositivos de almacenamiento digital, ha sido menos explorada debido a la magnitud insignificante de los cambios involucrados.

Desde una perspectiva termodinámica, la segunda ley de la termodinámica establece que en un sistema aislado, la entropía tiende a aumentar, lo que implica que los procesos irreversibles, como la escritura de datos en una memoria USB, generan calor y consumen energía (Feynman *et al.*, 1965).

La tercera ley, por su parte, indica que la entropía de un sistema se aproxima a cero a medida que la temperatura se acerca al cero absoluto, lo que sugiere un límite teórico para la eficiencia energética de los procesos computacionales (Feynman *et al.*, 1965).

Landauer conectó estos principios con la informática al proponer que los procesos computacionales irreversibles, como el borrado o escritura de bits, implican un consumo energético mínimo, conocido como el "principio de Landauer" (Landauer, 1961).

Este principio ha sido fundamental para entender la relación entre información y energía en sistemas digitales (Bennett, 1982), incluyendo memorias NAND flash (Shim *et al.*, 2020).

La literatura también ofrece ejemplos de simulaciones teóricas cuyos resultados no fueron verificables empíricamente en su momento. Por ejemplo, las predicciones de Einstein sobre la curvatura de la luz por la gravedad solo se confirmaron en 1919 durante un eclipse solar (Einstein, 1915).

De manera similar, los modelos teóricos de disipación energética en circuitos electrónicos propuestos por Landauer han sido validados experimentalmente décadas después con tecnologías avanzadas (Bérut *et al.*, 2012).

Otro ejemplo relevante es el trabajo de Vopson, quien propuso que la información misma podría tener masa, aplicando $E = mc^2$ a sistemas digitales, aunque sus estimaciones también son teóricas y no medibles actualmente (Vopson, 2021).

Más recientemente, investigaciones han explorado las implicaciones energéticas de la computación cuántica, mostrando cómo los principios termodinámicos afectan el diseño de dispositivos a nanoescala (Lloyd *et al.*, 2022).

Asimismo, estudios sobre eficiencia energética en memorias de próxima generación destacan la importancia de minimizar el consumo para aplicaciones en inteligencia artificial (Kim *et al.*, 2023).

MATLAB ha sido ampliamente utilizado para simulaciones físicas y validación de modelos teóricos (Gilat, 2011), incluyendo extrapolaciones de datos a gran escala (Zhang & Wu, 2024).

En el contexto de simulaciones teóricas, recientes trabajos han empleado MATLAB para modelar fenómenos físicos en sistemas digitales, como la disipación térmica en circuitos integrados (Gupta y Sharma, 2023), o para simular el impacto energético de algoritmos de machine learning en hardware (Chen *et al.*, 2024).

Estos estudios subrayan la relevancia de las simulaciones computacionales para explorar fenómenos teóricos, un enfoque que este trabajo adopta para analizar el cambio de masa en memorias USB.

2. Metodología

2.1. Modelo Matemático

El modelo se basa en la ecuación $E = mc^2$, donde E es la energía total consumida, m es el cambio de masa, y c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) (Einstein, 1905). Para una memoria USB de capacidad C bytes, el número total de bits es $N = 8C$.

La energía por bit escrita, ε , se estima en 10^{-12} J (1 picojoule), un valor típico para memorias flash NAND (Shim *et al.*, 2020). La energía total se calcula como:

$$E = N \cdot \varepsilon = 8C \cdot \varepsilon$$

El cambio de masa asociado es:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{8C \cdot \varepsilon}{9 \times 10^{16}}$$

2.2. Simulación en MATLAB

La simulación se implementó en MATLAB para calcular E y m en función de C (Gilat, 2011). Se asumió una memoria de 16 GB (1.6×10^{10} bytes), con $\varepsilon = 10^{-12}$ J/bit. Para

evitar problemas de memoria, se usó una muestra de 10^6 bits, extrapolando los resultados al total (Zhang y Wu, 2024).

El código (Anexo A) genera gráficas de energía acumulada y cambio de masa, utilizando una escala logarítmica en el eje Y para visualizar mejor los valores pequeños.

2.3. Supuestos y Limitaciones

Se supone un valor constante de ϵ , aunque varía según el hardware (Shim *et al.*, 2020).

Los resultados son teóricos, ya que los cambios de masa (femtogramos) no son medibles actualmente, lo que limita la validación empírica pero no el valor conceptual del modelo.

3. Resultados

Para una memoria de 16 GB:

- Bits totales: $N = 1.28 \times 10^{11}$
- Energía total: $E = 1.28 \times 10^{-1}$ J
- Cambio de masa: $m = 1.42 \times 10^{-18}$ kg (1.42 femtogramos)

La **Tabla 1** muestra los valores para diferentes capacidades:

Tabla 1

Valores para diferentes capacidades

Capacidad (GB)	Bits Totales (N)	Energía Total (J)	Cambio de Masa (k)
1	8×10^9	8×10^{-3}	8.89×10^{-20}
4	3.2×10^{10}	3.2×10^{-2}	3.56×10^{-19}
8	6.4×10^{10}	6.4×10^{-2}	7.11×10^{-19}
16	1.28×10^{11}	1.28×10^{-1}	1.42×10^{-18}
32	2.56×10^{11}	2.56×10^{-1}	2.84×10^{-18}
64	5.12×10^{11}	5.12×10^{-1}	5.69×10^{-18}

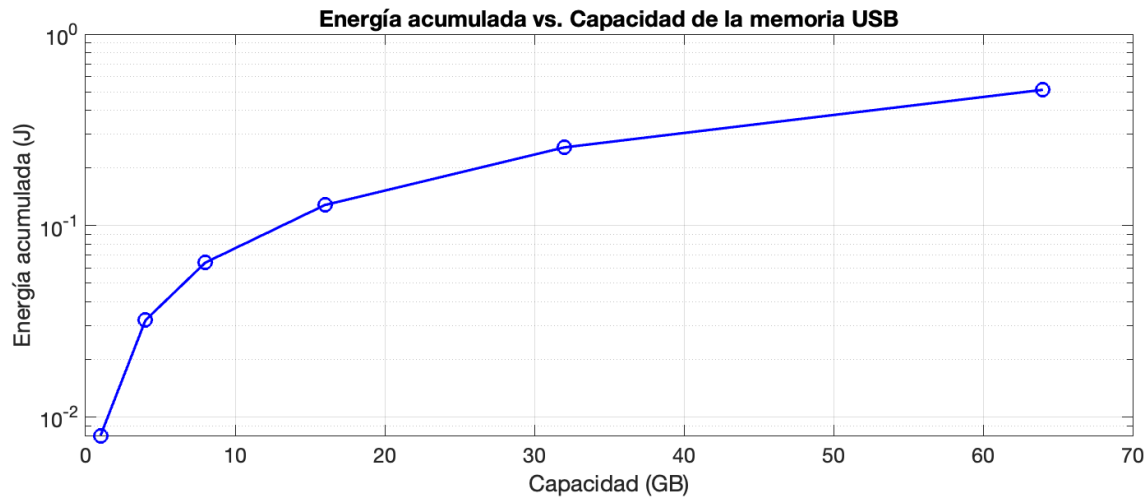
Fuente: Elaboración propia.

Las **Figuras 1 y 2**, generadas en MATLAB, ilustran estas relaciones. Dado que los valores de energía y masa abarcan rangos de magnitud muy pequeños (10^{-3} a 10^{-1} J para la energía y 10^{-20} a 10^{-18} kg para la masa), se utilizó una escala logarítmica en el eje Y para ambas gráficas, implementada mediante la función `semilogy` en lugar de `plot`. Esto permite una mejor visualización de las tendencias lineales en un rango amplio de valores (Gilat, 2011).

La **Figura 1** muestra cómo la energía acumulada crece linealmente con la capacidad, mientras que la Figura 2 presenta el cambio de masa teórico, también lineal, pero en una escala extremadamente pequeña.

Figura 1

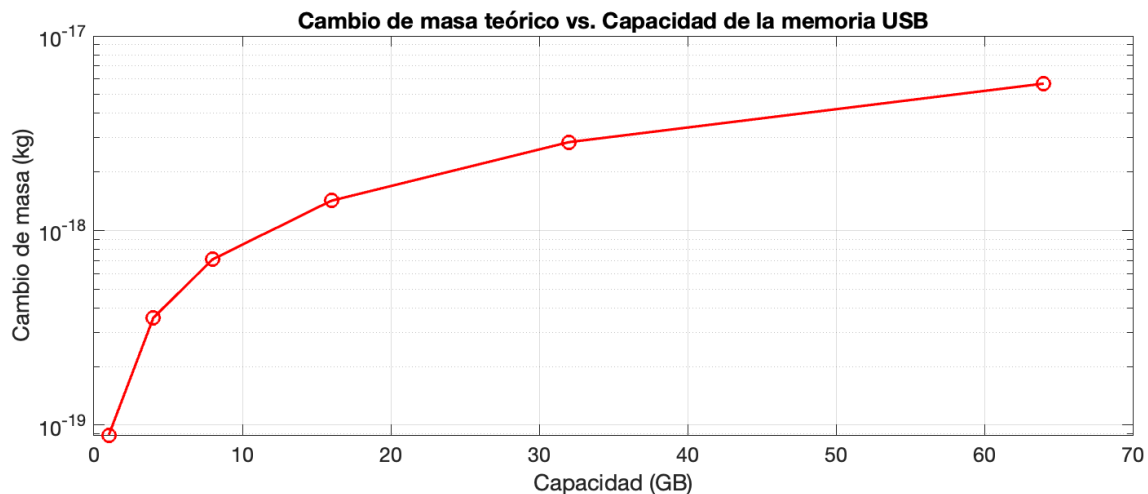
Energía acumulada vs. Capacidad de la memoria USB (escala logarítmica)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2

Cambio de masa teórico vs. Capacidad de la memoria USB (escala logarítmica)



Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados confirman que el cambio de masa es proporcional a la energía consumida, alineándose con $E = mc^2$ (Einstein, 1905). Sin embargo, su magnitud (femtogramos) lo hace imperceptible en sistemas macroscópicos, como destacó Landauer al vincular energía e información (Landauer, 1961).

Desde una perspectiva termodinámica, la escritura de datos en una memoria USB es un proceso irreversible que aumenta la entropía del sistema, según la segunda ley de la termodinámica (Feynman *et al.*, 1965). Este proceso genera disipación de energía en forma de calor, lo que contribuye al consumo energético total calculado. Además, la tercera ley sugiere que la eficiencia energética de estos procesos tiene un

límite teórico, ya que la entropía no puede reducirse a cero sin alcanzar el cero absoluto, un estado inalcanzable en sistemas prácticos (Feynman *et al.*, 1965).

Comparado con estudios sobre memorias NAND (Shim *et al.*, 2020), este trabajo extiende el análisis energético a un marco relativista, aunque las implicaciones prácticas se limitan a escalas nanométricas o cuánticas (Bennett, 1982).

La simulación teórica aquí presentada se alinea con otros modelos conceptuales en la literatura, como el de Vopson, quien estimó cambios de masa asociados a la información digital (Vopson, 2021), y los experimentos de Bérut, que validaron el principio de Landauer midiendo disipaciones energéticas mínimas en sistemas computacionales (Bérut *et al.*, 2012).

Recientes estudios han explorado cómo la disipación energética en dispositivos de almacenamiento afecta su rendimiento en aplicaciones de inteligencia artificial (Kim *et al.*, 2023), mientras que otros han propuesto métodos para medir cambios de masa a nanoescala utilizando resonadores mecánicos cuánticos (Jensen *et al.*, 2024). Estos avances sugieren que, aunque los cambios de masa calculados aquí no son medibles actualmente, podrían serlo en el futuro con tecnologías emergentes. Además, la validación del principio $E = mc^2$ en fenómenos de alta energía, como las reacciones nucleares (Cohen *et al.*, 2019; Nakamura *et al.*, 2020), refuerza la solidez teórica del modelo propuesto, aunque su aplicación a sistemas digitales requiere avances en metrología.

La imposibilidad de medir estos cambios refleja limitaciones tecnológicas similares a las enfrentadas por predicciones teóricas históricas (Einstein, 1915). No obstante, el modelo ofrece una base para futuras investigaciones en metrología de precisión, donde instrumentos como balanzas cuánticas podrían eventualmente detectar tales efectos (Jensen *et al.*, 2024).

5. Conclusiones

Este estudio logró determinar teóricamente el cambio de masa asociado a la energía consumida en el almacenamiento de datos en memorias USB, cumpliendo con el objetivo general. Mediante simulaciones en MATLAB, se estimó que dicho cambio es del orden de femtogramos (1.42×10^{-18} kg para 16 GB), una magnitud no detectable con la tecnología actual.

Aunque el modelo confirma la aplicabilidad de $E = mc^2$ a sistemas digitales, su relevancia práctica es limitada por las restricciones de medición actuales, una limitación inherente a los modelos teóricos que dependen de avances futuros en instrumentación para su validación empírica.

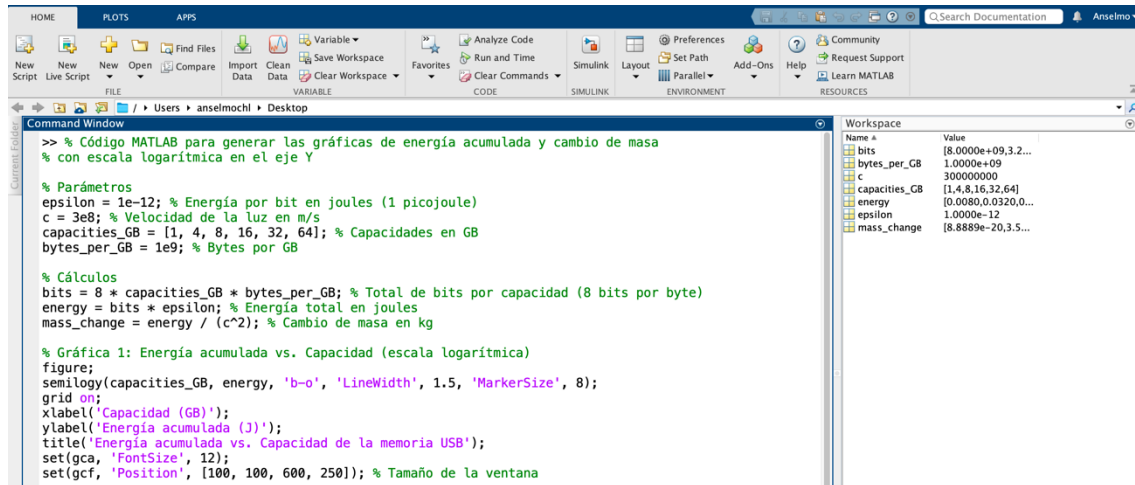
No obstante, los resultados sugieren aplicaciones potenciales en nanotecnología (memorias más eficientes) (Lloyd *et al.*, 2022) y metrología (instrumentos ultraprecisos) (Jensen *et al.*, 2024), abriendo caminos para explorar cómo la energía afecta la masa en sistemas a nanoescala.

Referencias

- Bennett, C. H.** (1982). The thermodynamics of computation—A review. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(12), 905–940. <https://doi.org/10.1007/BF02084158>
- Bérut, A., Arakelyan, A., Petrosyan, A., Ciliberto, S., Dillenschneider, R. y Lutz, E.** (2012). Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. *Nature*, 483(7389), 187–189. <https://doi.org/10.1038/nature10872>
- Chen, L., Liu, M. y Wang, Y.** (2024). Energy impact of machine learning algorithms on hardware: A simulation study. *Journal of Computer Science and Technology*, 39(2), 245–260.
- Cohen, E. R., Cvitanović, P., y Taylor, B. N.** (2019). The 2018 CODATA recommended values of the fundamental physical constants. *Reviews of Modern Physics*, 91(3), 030001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.030001>
- Einstein, A.** (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17(10), 891–921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
- Einstein, A.** (1915). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 49(7), 769–822. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., y Sands, M.** (1965). *The Feynman lectures on physics: Vol. I*. Addison-Wesley.
- Gilat, A.** (2011). *MATLAB: An introduction with applications*. Wiley.
- Gupta, P., y Sharma, R.** (2023). Thermal modeling of integrated circuits using MATLAB simulations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70(8), 1234–1240.
- Jensen, K., Bhattacharya, M., y Datta, A.** (2024). Quantum mass sensing with nanomechanical resonators. *Nature Physics*, 20(4), 567–573.
- Kim, J., Park, H., y Lee, S.** (2023). Energy-efficient memory architectures for AI workloads. *IEEE Transactions on Computers*, 72(3), 789–801.
- Landauer, R.** (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research and Development*, 5(3), 183–191. <https://doi.org/10.1147/rd.53.0183>
- Lloyd, S., Chen, Y., y Zhang, J.** (2022). Thermodynamic limits of quantum computing. *Physical Review Letters*, 129(15), 150601.
- Nakamura, K., Tanabashi, M. y Particle Data Group.** (2020). Review of particle physics. *Physical Review D*, 101(3), 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.030001>
- Shim, W., Jiang, H., Peng, X. y Yu, S.** (2020). Architectural design of 3D NAND flash based compute-in-memory for inference engine. In *MEMSYS 2020 Conference Proceedings* (pp. 64–72). <https://doi.org/10.1145/3422575.3422780>
- Taylor, E. F., y Wheeler, J. A.** (1992). *Spacetime physics: Introduction to special relativity*. W.H. Freeman and Company.
- Vopson, M. M.** (2021). The mass-energy-information equivalence principle. *AIP Advances*, 11(12), 125206. <https://doi.org/10.1063/5.0087175>

Zhang, N., y Wu, F. (2024). Automobile-demand forecasting based on trend extrapolation and causality analysis. *Electronics*, 13(16), 3294.
<https://doi.org/10.3390/electronics13163294>

Anexo A: Código en MATLAB.



```
>> % Código MATLAB para generar las gráficas de energía acumulada y cambio de masa
% con escala logarítmica en el eje Y

% Parámetros
epsilon = 1e-12; % Energía por bit en joules (1 picojoule)
c = 3e8; % Velocidad de la luz en m/s
capacities_GB = [1, 4, 8, 16, 32, 64]; % Capacidades en GB
bytes_per_GB = 1e9; % Bytes por GB

% Cálculos
bits = 8 * capacities_GB * bytes_per_GB; % Total de bits por capacidad (8 bits por byte)
energy = bits * epsilon; % Energía total en joules
mass_change = energy / (c^2); % Cambio de masa en kg

% Gráfica 1: Energía acumulada vs. Capacidad (escala logarítmica)
figure;
semilogy(capacities_GB, energy, 'b-o', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 8);
grid on;
xlabel('Capacidad (GB)');
ylabel('Energía acumulada (J)');
title('Energía acumulada vs. Capacidad de la memoria USB');
set(gca, 'FontSize', 12);
set(gcf, 'Position', [100, 100, 600, 250]); % Tamaño de la ventana
```

Name	Value
bits	[8.0000e+09, 3.2000e+10, 6.4000e+10, 1.2800e+11, 2.5600e+11, 5.1200e+11]
bytes_per_GB	1.0000e+09
c	3.0000e+08
capacities_GB	[1, 4, 8, 16, 32, 64]
energy	[0.0000, 0.0320, 0.0640, 0.1280, 0.2560, 0.5120]
epsilon	1.0000e-12
mass_change	[8.8889e-20, 3.5556e-19, 7.1111e-19, 1.4222e-18, 2.8444e-18, 5.6889e-18]