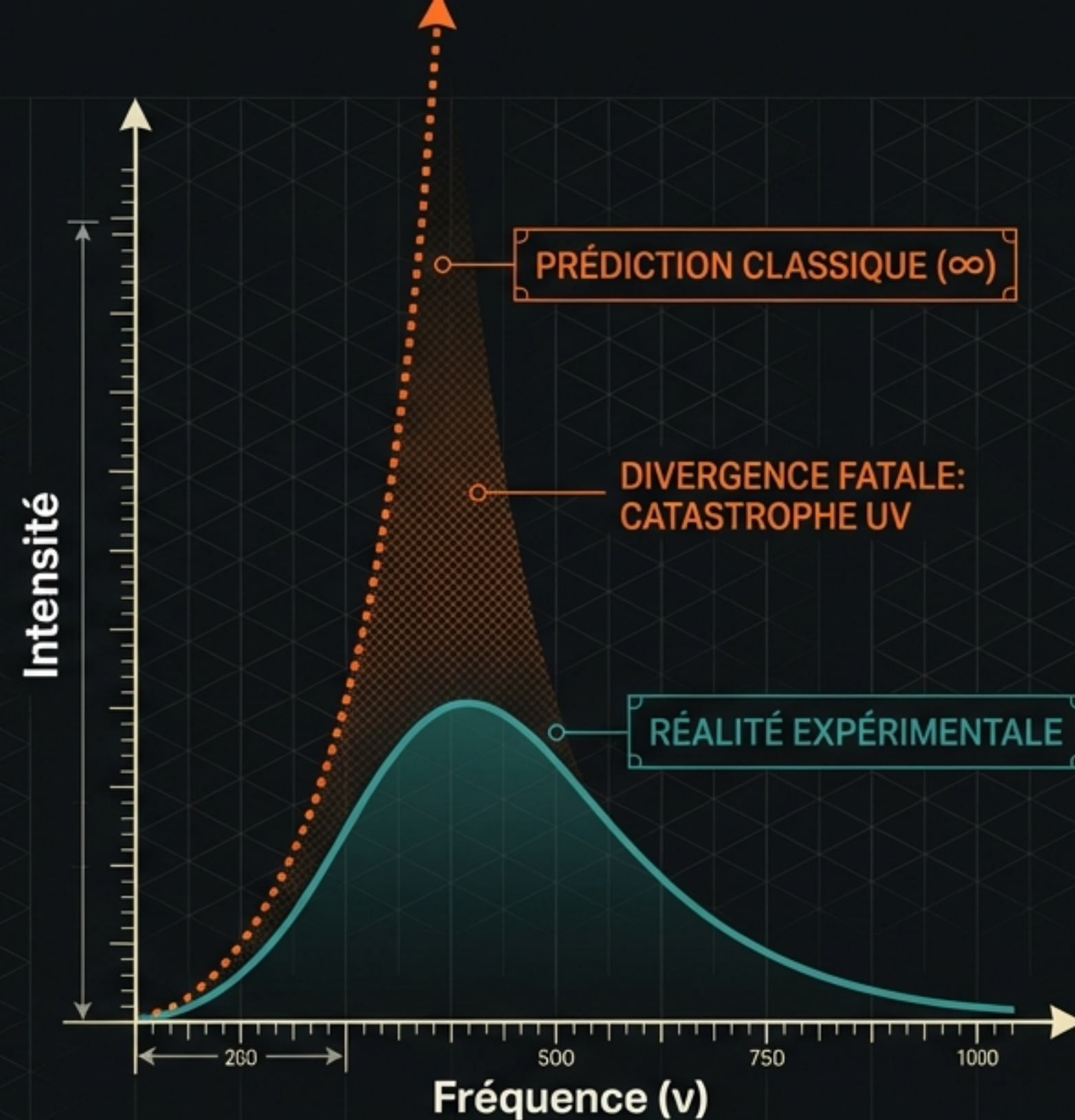
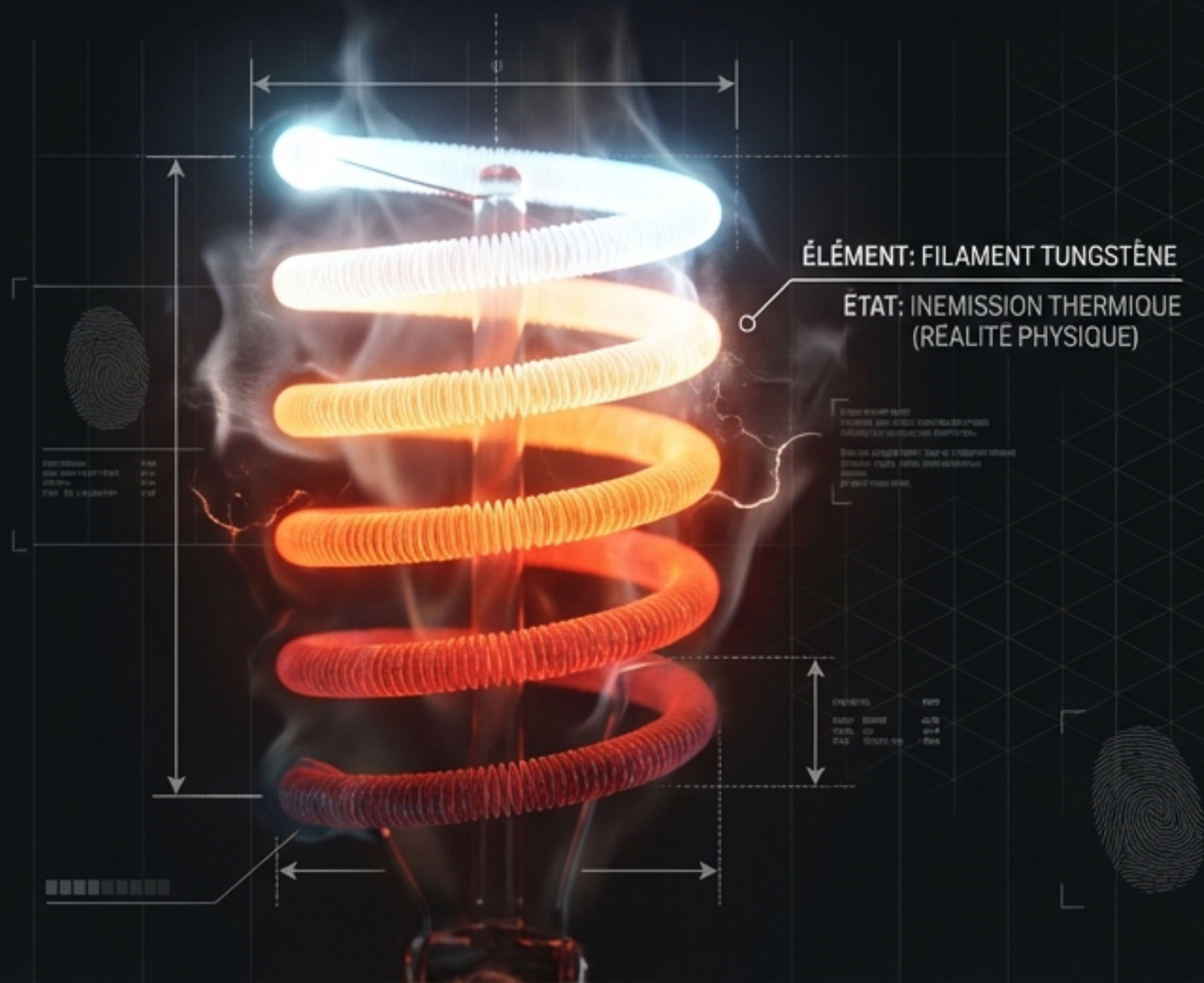


LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE

Une autopsie physique



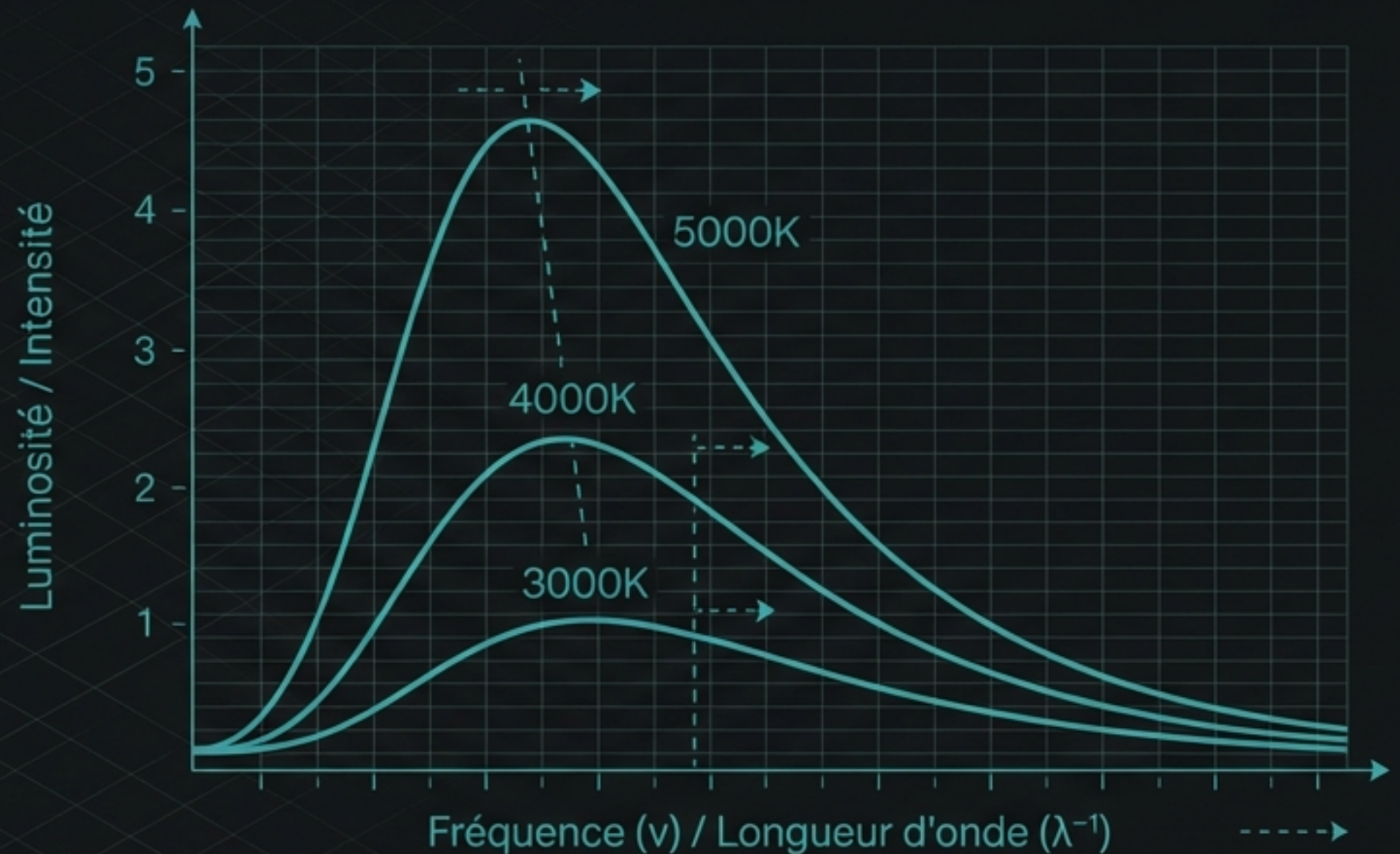
À la fin du XIX^e siècle, la physique classique faisait une prédiction fatale : tout objet chaud devrait émettre une quantité infinie d'énergie. Ce n'était pas une simple erreur de calcul, mais une faille fondamentale dans notre compréhension de la nature.

La Preuve Expérimentale : Le Corps Noir

Définition : Un système en équilibre thermique qui absorbe et réémet parfaitement le rayonnement.

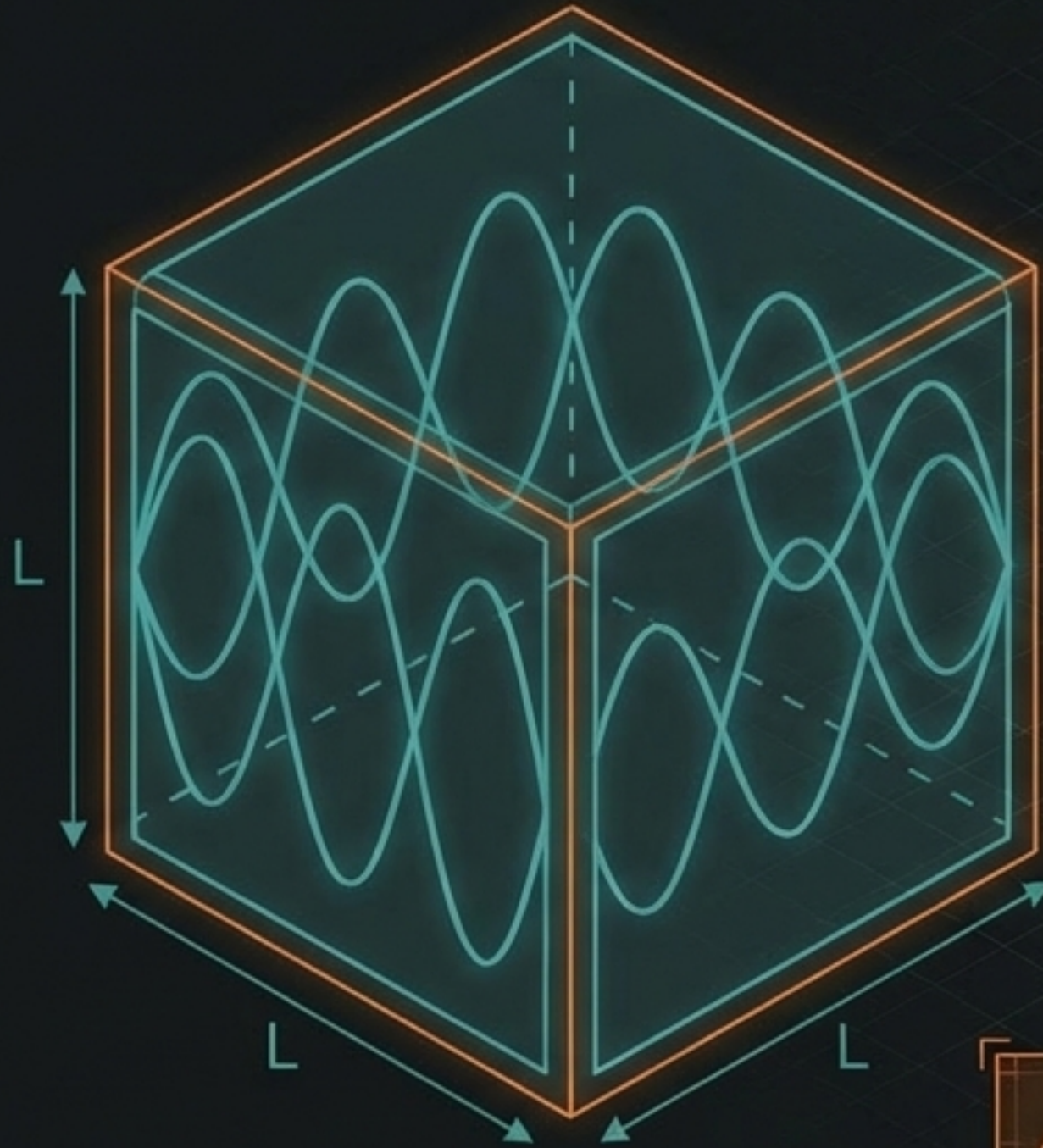
Observation : Quand la température (T) augmente, le pic de luminosité se déplace vers les hautes fréquences (Loi de déplacement de Wien).

La Réalité : La cavité rougit, puis jaunit, puis blanchit. L'énergie totale reste toujours finie.



Le Mystère : Pourquoi ne sommes-nous pas bombardés de rayons gamma dès que nous allumons un four ?

La Scène du Crime : La Cavité Résonnante



Le Modèle

- Une boîte métallique cubique de côté L .
- Parois conductrices : Champ électrique $E = 0$ aux frontières.

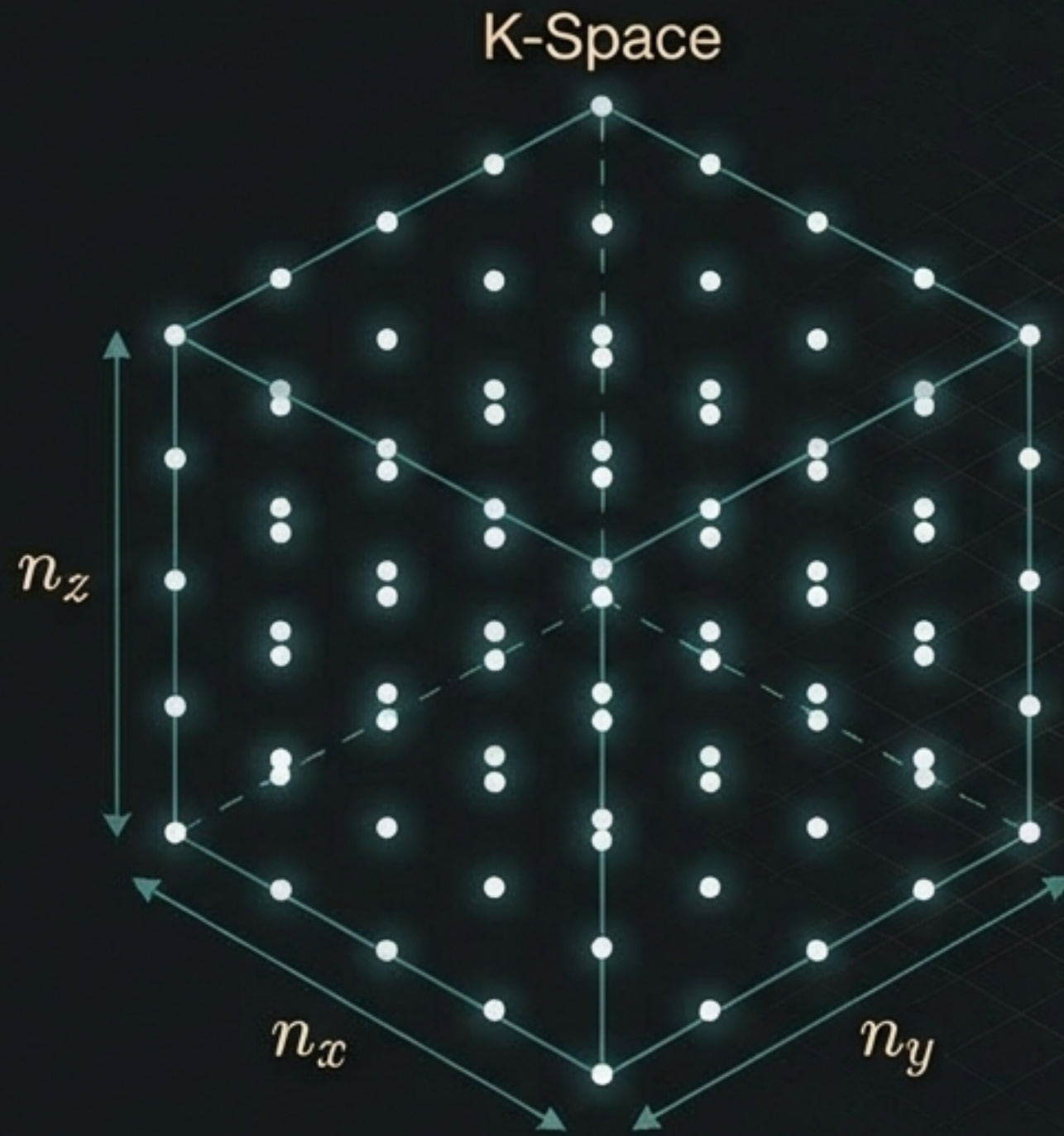
Conséquence

Le rayonnement est piégé sous forme d'ondes stationnaires. Seules certaines longueurs d'onde sont permises mathématiquement.



Le Mystère : Pourquoi ne sommes-nous pas bombardés de rayons gamma dès que nous allumons un four ?

Suspect N°1 : La Géométrie des Ondes



****Conditions aux limites :**

$$k_x = n_x \frac{\pi}{L}, \quad k_y = n_y \frac{\pi}{L}, \quad k_z = n_z \frac{\pi}{L}$$

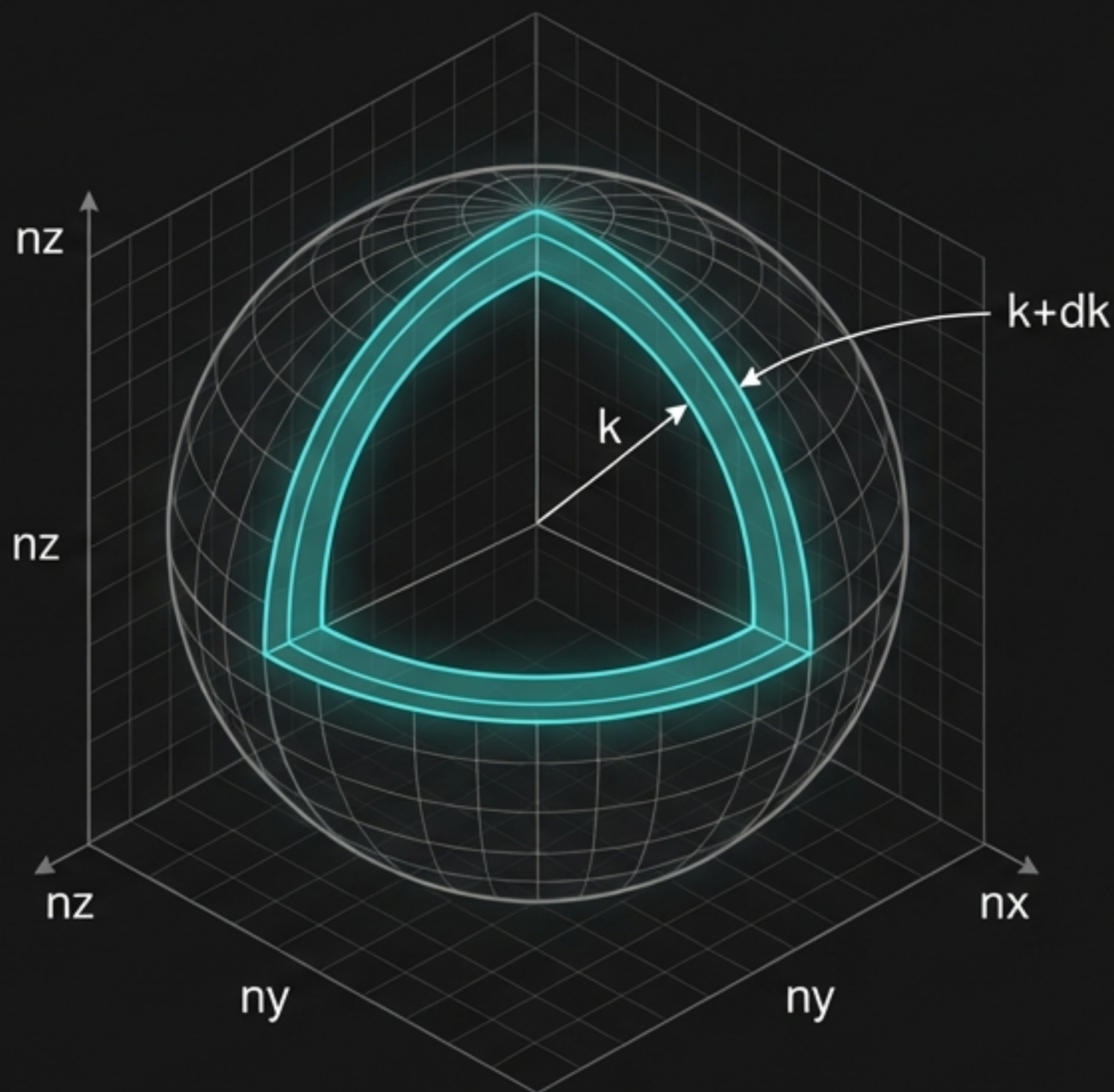
(n sont des entiers positifs)

****Analyse :**

L'espace des phases est discret. Les modes permises forment un réseau régulier. Chaque point est un 'mode' possible.

VERDICT : CORRECT
(Quantification Géométrique)

Le Comptage : La Croissance Quadratique



Calcul du Volume :

On compte les points dans une coquille sphérique.

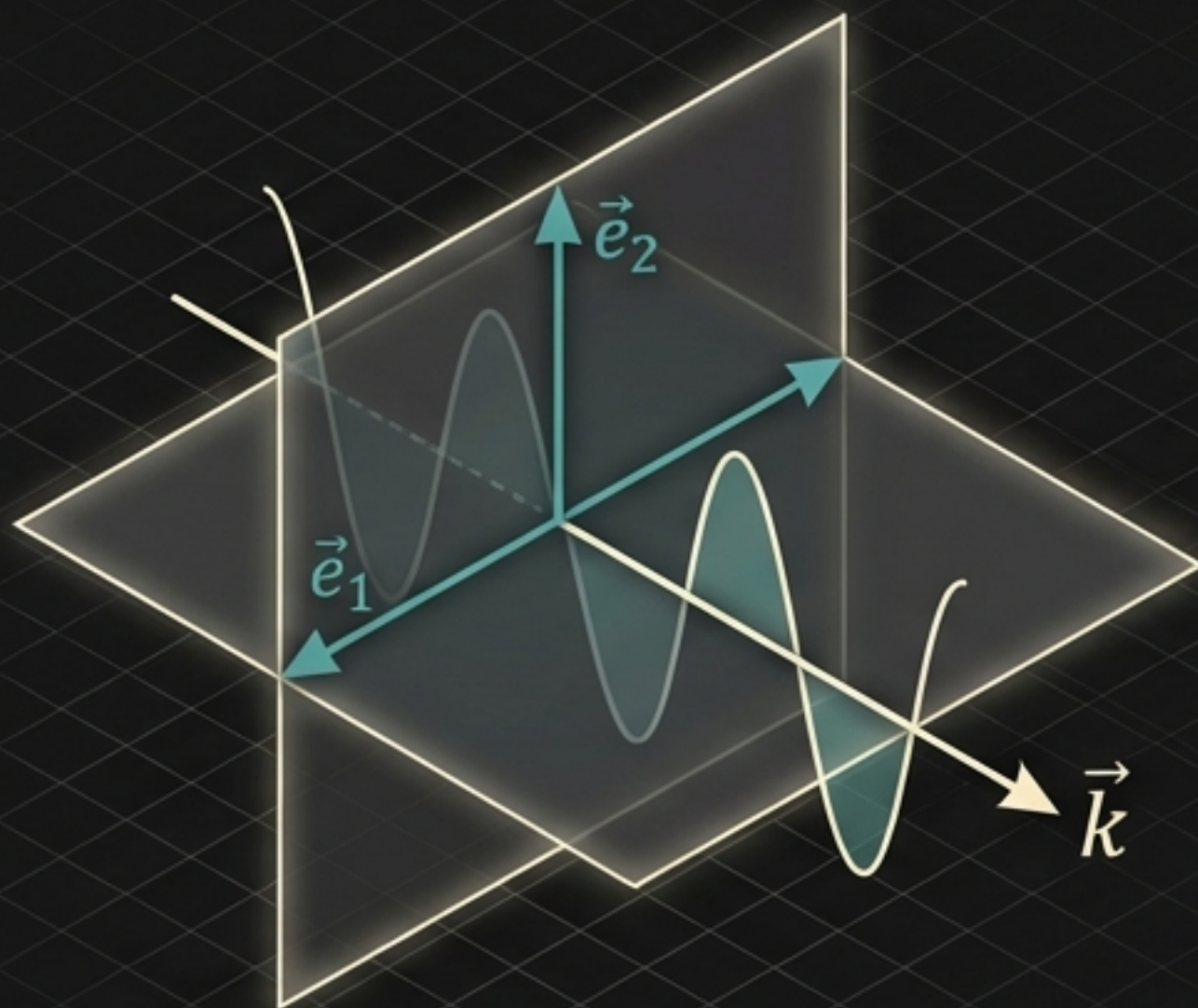
$$\text{Volume} \approx 4\pi k^2 dk$$

Résultat Clé :

Le nombre de modes (N) augmente avec le carré de la fréquence (ν^2).

Il y a beaucoup plus de 'conteneurs' pour l'énergie à haute fréquence qu'à basse fréquence.

Le Facteur de 2 : La Polarisation



Détail Technique :

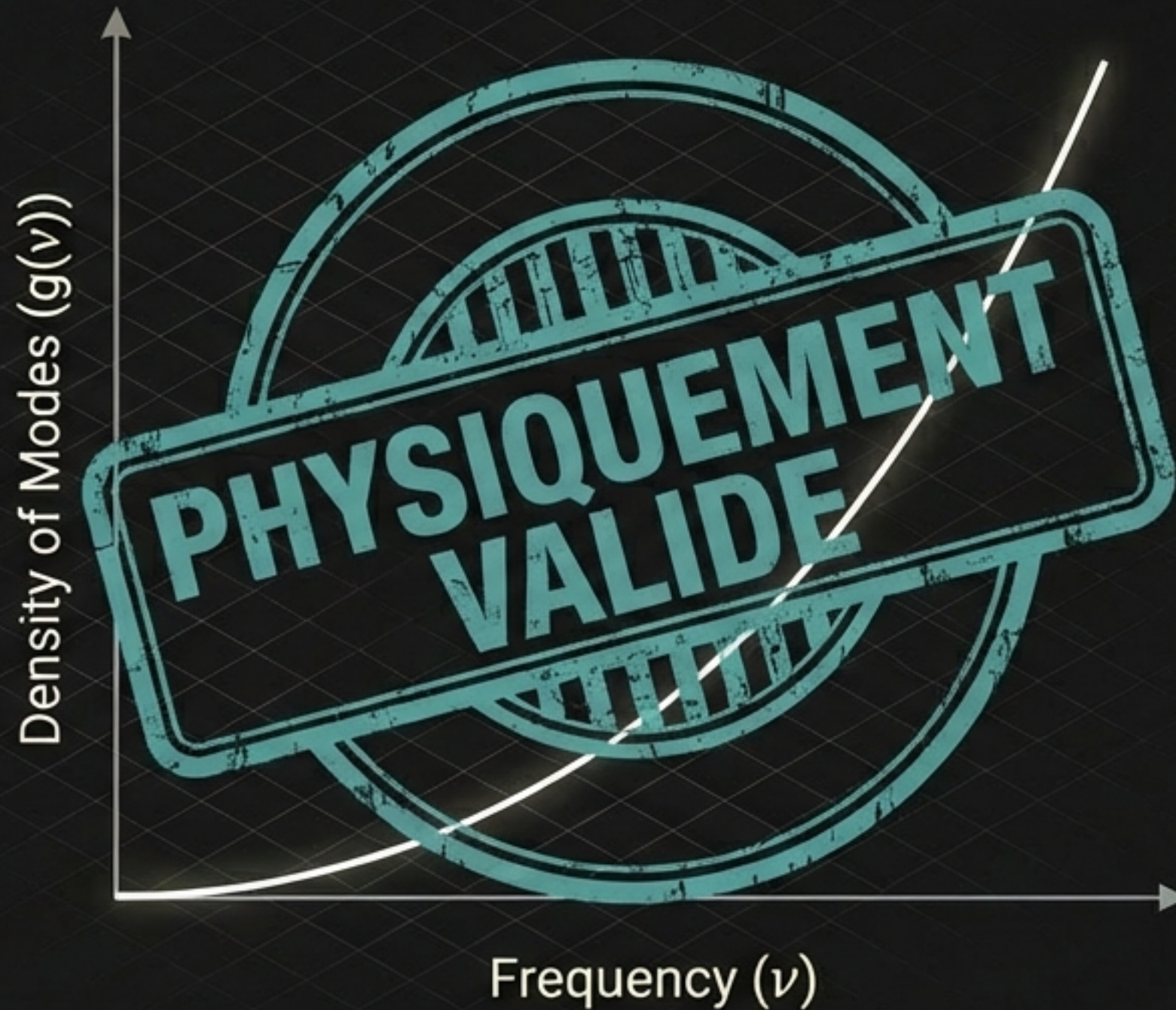
- Une onde électromagnétique est transverse ($\vec{E} \perp \vec{k}$).
- Pour chaque direction de propagation, il existe deux directions indépendantes d'oscillation.

Correction :

Nous devons multiplier le comptage des modes par 2.

“Pour chaque fréquence autorisée, il existe deux oscillateurs indépendants.”

Le Résultat Géométrique (Validé)



$$g(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

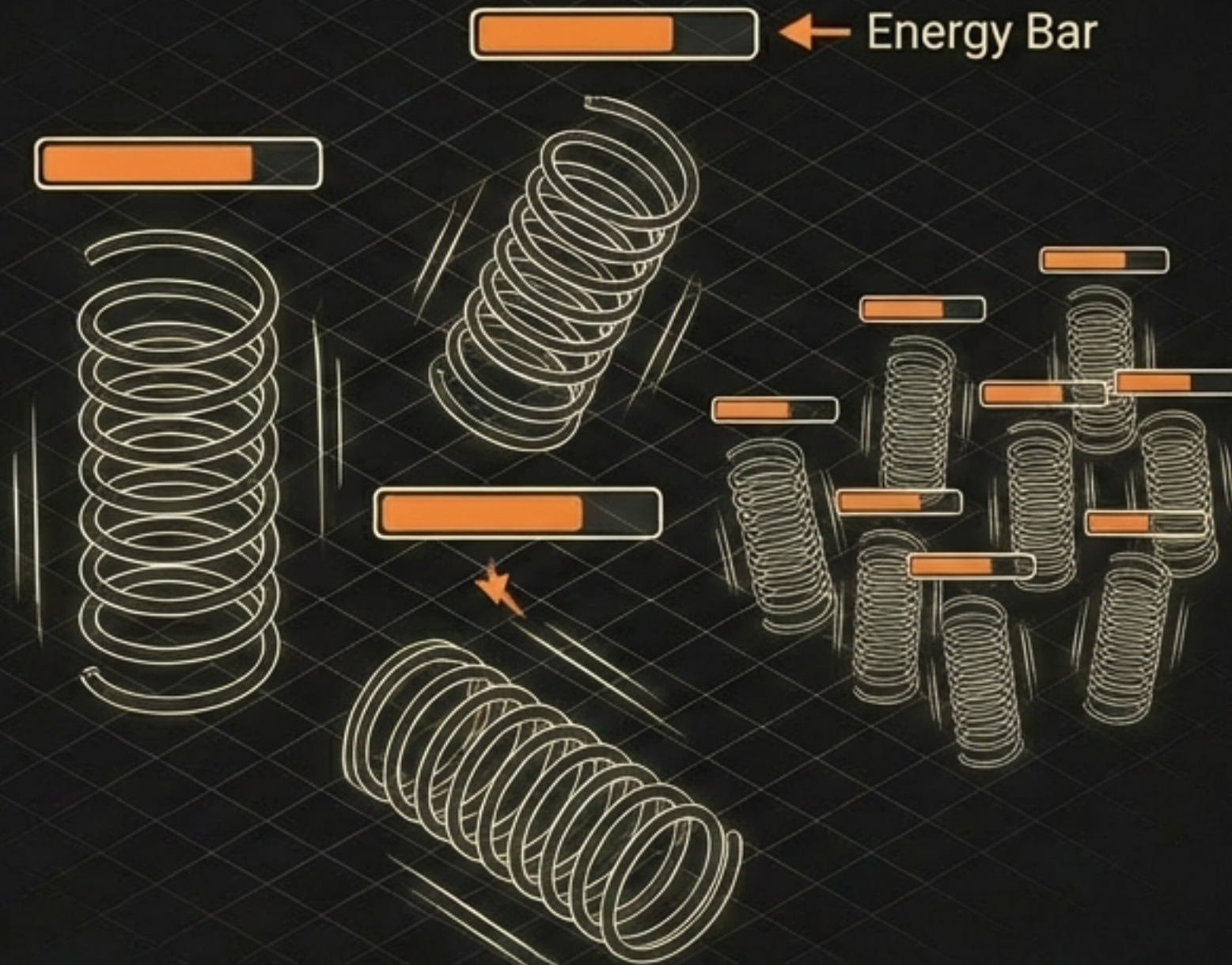
Ce terme représente le nombre de 'boîtes' disponibles pour stocker l'énergie.

Il croît indéfiniment avec la fréquence.

****Note de l'enquêteur :**

Jusqu'ici, aucune erreur. Le comptage des modes est physiquement juste.

Le Coupable : L'Équipartition de l'Énergie



****Théorème de l'Équipartition**

À l'équilibre thermique T , chaque degré de liberté reçoit la même **énergie** moyenne.

$$\langle E \rangle = k_B T$$

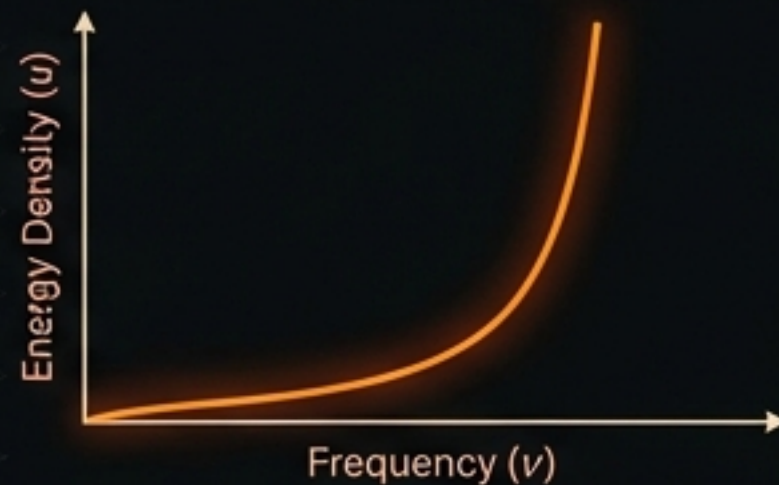
****Le Piège :**

Cette loi suppose que **l'énergie est continue** et **ne dépend pas de la fréquence**.

L'Équation du Désastre (Loi de Rayleigh-Jeans)

$$\left[\text{Densité de Modes } (\propto \nu^2) \right] \times \left[\text{Énergie Moyenne } (k_B T) \right] \rightarrow \left[\text{CATASTROPHE} \right]$$

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T$$



Verdict : L'intégrale totale diverge ($\int \nu^2 d\nu \rightarrow \infty$).

Prédiction : Une cavité à température ambiante contient une énergie infinie.

Pourquoi ça rate ? L'Erreur du Continuum



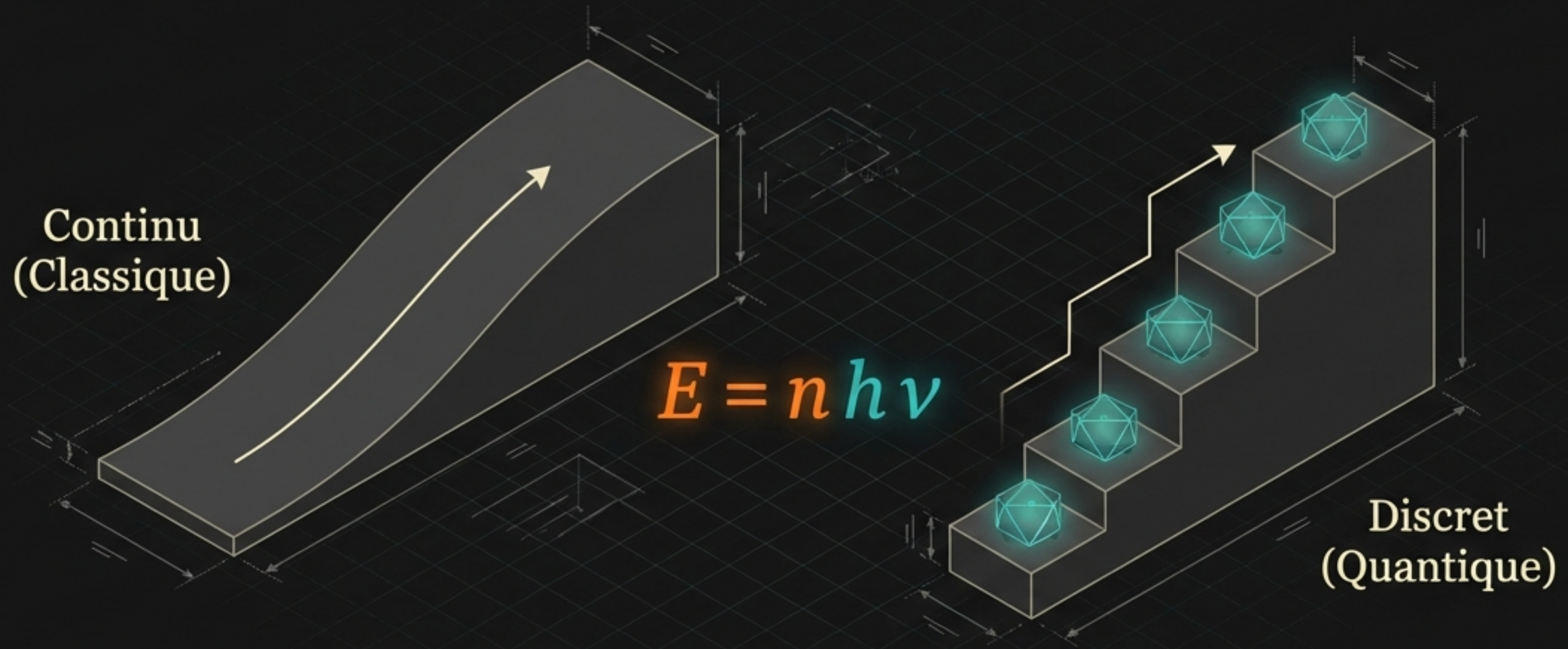
****Vision Classique****

L'amplitude d'une oscillation peut être arbitrairement petite. On peut toujours mettre "un tout petit peu" d'énergie dans les modes à ultra-haute fréquence.

Comme il y a une infinité de ces modes, ils aspirent une quantité infinie d'énergie.

Le Problème : L'absence de "ticket d'entrée" (seuil d'excitation).

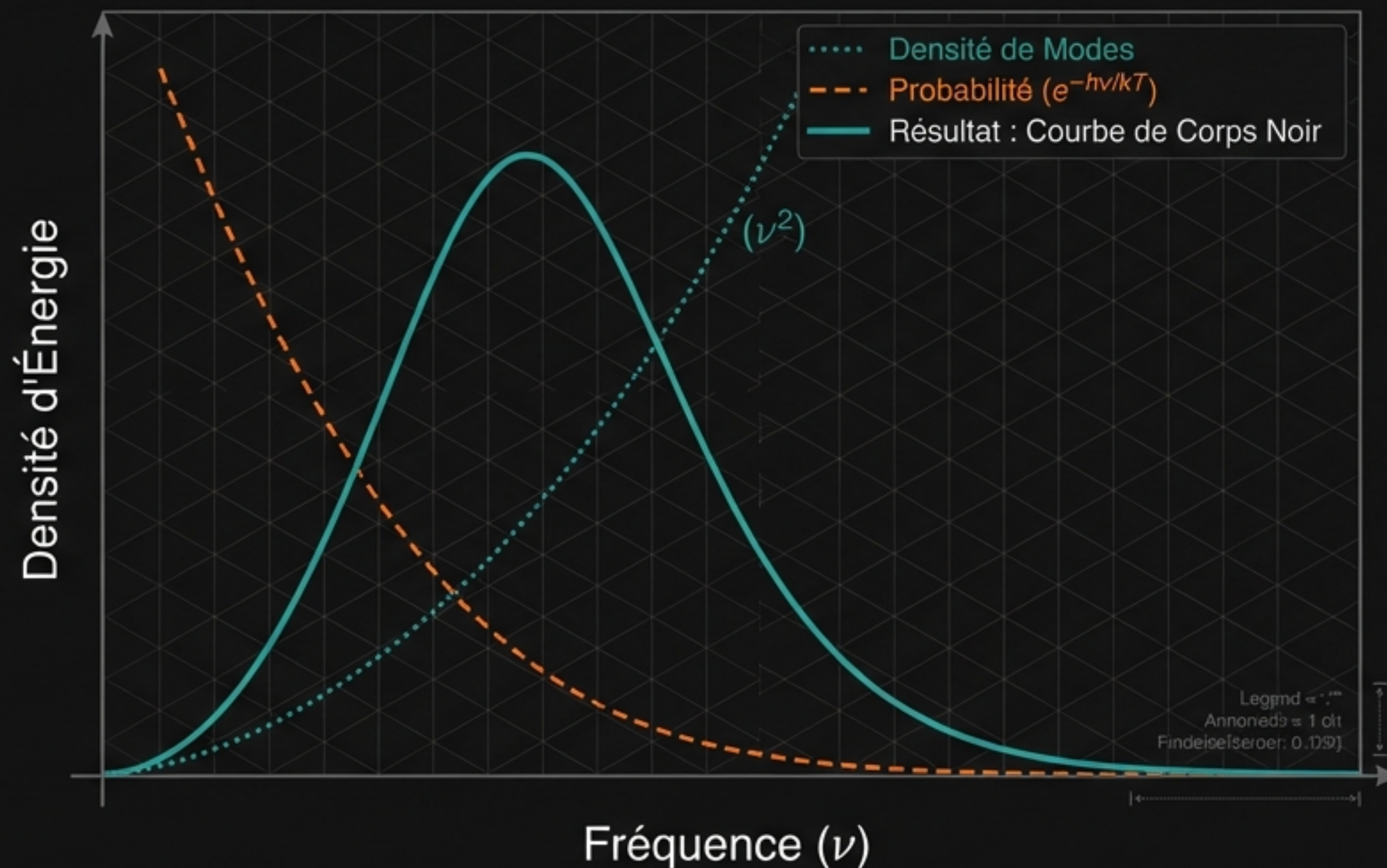
La Révolution de Planck : La Granularité



****L'Hypothèse :** L'énergie d'un oscillateur n'est pas continue. Elle existe par paquets discrets (quanta).

****Concept :** Il y a un coût minimum pour activer un mode. Le prix du ticket est $h\nu$.

Le Filtre Exponentiel (Facteur de Boltzmann)



Le Mécanisme :

À haute fréquence, $h\nu \gg k_B T$. Le coût énergétique est trop élevé. La probabilité d'occupation chute exponentiellement.

Résultat : L'exponentielle écrase la croissance quadratique. L'énergie est finie.

Correction Conceptuelle : Oscillateur vs Photon



Mythe

FAUX : “Un photon est un oscillateur harmonique.”

Réalité

VRAI : Le *mode* du champ est l'oscillateur. Le *photon* est le quantum d'excitation de cet oscillateur ($n \rightarrow n+1$).

Le Verdict de l'Enquête

La Géométrie (Comptage des modes)	✓	INNOCENT
Les Équations de Maxwell (Ondes)	✓	INNOCENT
L'Équipartition (Énergie Continue)	✗	COUPABLE

La catastrophe n'était pas due à un mauvais calcul, mais à l'hypothèse que la nature est infiniment divisible.

L'Héritage : Un Monde Quantique



En résolvant le problème du corps noir, Planck n'a pas seulement corrigé une courbe. Il a découvert que l'énergie est granulaire.

Les 'particules' (photons) ne sont que les excitations quantifiées
d'un champ fondamental.

Basé sur 'On the Quantum Theory of Radiation' d'A. Einstein et le cours de physique statistique.