

into an operant and respondent conditioning chamber that permits radiation during behavioral testing. The achievement of controllable energy dosing of animals in behavioral experiments was something of a challenge because we had to design and incorporate a special response-detection and payoff system for operant conditioning that would not interact with the microwave fields inside the cavity's conditioning chamber (King, Justesen, & Simpson, 1970). A similar challenge, that of providing a noninteractive source of aversive electrical stimulation for Pavlovian conditioning, was met by the design and incorporation of a faradic shocking device (Justesen, King, & Clarke, 1971).

We sought to cope with the energy-scaling problem by using calorimetric dosimetry; whereas the densitometer measures energy in proximity to a target, the calorimetric technique provides estimates of the amount of energy actually absorbed by a biological target (cf. Justesen & King, 1970; Justesen, Levinson, Clarke, & King, 1971; Justesen, Levinson, & Justesen, 1974). Taking our lead from the ionizing radiobiologists, we proposed a convention based on absorbed energy per gram unit of mass. Because of the high-photon energies of X- and gamma-rays, the rad—the standard unit of absorbed dose of ionizing radiation—is couched in relatively minuscule terms of only 100 ergs per gram. For the microwaves with their low-photon energies, we proposed that  $10^7$  ergs or one joule per

gram (J/g) serve as the dosing unit of total absorbed energy. Since the joule per second is the time-complexed quantity of energy that defines the watt, we also proposed that the watt per gram (W/g) serve as the basic unit of rate of dosing.

To estimate the amount of energy absorbed by an animal in a microwave field, we employ simple thermometry, the measurement of elevation of temperature ( $\Delta t$ ) in phantom models by precision electronic thermometers. In the multimode cavity, the  $\Delta t$ s of cylindrical models of water can provide an estimate within 10% of the energy actually absorbed by small animals of equivalent mass (Phillips, Hunt, & King, 1975). The quantity of energy in watts is readily calculated from the  $\Delta t$ s and is then divided by the animal's weight in grams to yield the rate of dosing. A 300-g rat under pulsed 2,450-MHz radiations has a dosing-rate threshold of perception near .5 mW/g (King et al., 1971). To place this value in a meaningful perspective, one can compare it to the rat's ambient rate of energy production through metabolism, which is near 10 mW/g in a standard environment. A 60-sec exposure of a 300-g animal that is absorbing microwave energy at a rate of .5 mW/g would maximally increase its averaged body temperature by .01° C.<sup>4</sup>

The calorimetric dosing method is a substantial improvement for experimental purposes over the traditional scaling technique in which the measured density of energy as incident upon an animal is used directly as the independent variable or else to estimate (via rough rules of thumb) the deposition of energy in the animal. Where errors of measurement greater than an order of magnitude are possible and, indeed, probable, with the traditional, densitometric methods of scaling, the calorimetric technique reduced the error to less than 10%. A psychologist, E. Hunt of the Battelle

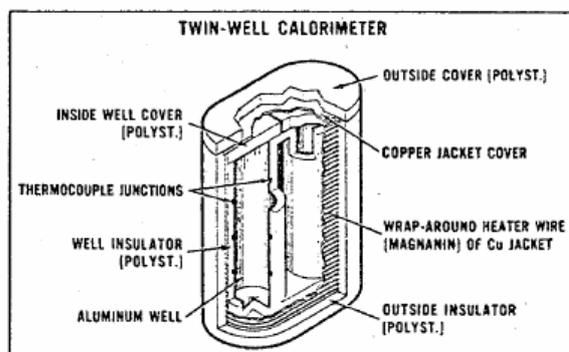


Figure 4. Schematic diagram of a twin-well difference-calorimeter developed at the Battelle Laboratories. (Highly precise measurements are made of the quantity of microwave energy absorbed by models or bodies of radiated animals. A reference or nonirradiated target is placed in one well, a radiated target in the other well; the difference in thermal loading is then detected by sensitive thermocouples.)

<sup>4</sup> The maximal rise of temperature is stipulated for the anesthetized animal. The awake, physiologically intact animal that is experimentally naive to radiation at detectable densities may exhibit an elevation of body temperature that is greater than that solely attributable to heating by microwaves. Apparently, the emotional activation induced by novel (or noxious) stimulation is associated with metabolic activation, and thus concomitant endogenous heating, which adds to the total thermal loading of a radiated animal (Justesen, Note 5). Unless there is a compensatory rise in rate of heat dissipation, an emotionally stressed animal may succumb from hyperthermia during radiation treatments that are not mortal for an habituated, unstressed, or anesthetized animal (Justesen, Levinson, Clarke, & King, 1971; Justesen et al., 1974).

---

**\*\*en une chambre de conditionnement\*\*** opérant et répondant qui permet l'irradiation pendant les tests comportementaux. La réalisation d'un dosage énergétique contrôlable des animaux dans les expériences comportementales a été un certain défi car nous avons dû concevoir et incorporer un système spécial de détection des réponses et de récompense pour le conditionnement opérant qui n'interagirait pas avec les champs micro-ondes à l'intérieur de la chambre de conditionnement de la cavité (King, Justesen, & Simpson, 1970). Un défi similaire, celui de fournir une source non interactive de stimulation électrique aversive pour le conditionnement pavlovien, a été relevé par la conception et l'incorporation d'un dispositif de choc faradique (Justesen, King, & Clarke, 1971).

Nous avons cherché à faire face au problème de la mise à l'échelle de l'énergie en utilisant la dosimétrie calorimétrique ; alors que le densitomètre mesure l'énergie à proximité d'une cible, la technique calorimétrique fournit des estimations de la quantité d'énergie réellement absorbée par une cible biologique (cf. Justesen & King, 1970 ; Justesen, Levinson, Clarke, & King, 1971 ; Justesen, Levinson, & Justesen, 1974). Prenant exemple sur les radiobiologistes des rayonnements ionisants, nous avons proposé une convention basée sur l'énergie absorbée par unité de masse en grammes. En raison des hautes énergies photoniques des rayons X et gamma, le rad — l'unité standard de dose absorbée de rayonnement ionisant — est exprimé en termes relativement minuscules de seulement 100 ergs par gramme. Pour les micro-ondes avec leurs faibles énergies photoniques, nous avons proposé que  $10^7$  ergs ou un joule par gramme (J/g) serve d'unité de dosage de l'énergie totale absorbée. Comme le joule par seconde est la quantité d'énergie complexée dans le temps qui définit le watt, nous avons également proposé que le watt par gramme (W/g) serve d'unité de base du taux de dosage.

Pour estimer la quantité d'énergie absorbée par un animal dans un champ micro-ondes, nous employons une simple thermométrie, la mesure de l'élévation de température ( $\Delta t$ ) dans des modèles fantômes par des thermomètres électroniques de précision. Dans la cavité multimode, les  $\Delta t$  de modèles cylindriques d'eau peuvent fournir une estimation à within 10% de l'énergie réellement absorbée par de petits animaux de masse équivalente (Phillips, Hunt, & King, 1975). La quantité d'énergie en watts est facilement calculée à partir des  $\Delta t$  et est ensuite divisée par le poids de l'animal en grammes pour donner le taux de dosage. Un rat de 300 g sous rayonnements pulsés de 2 450 MHz a un seuil de taux de dosage de perception proche de 0,5 mW/g (King et al., 1971). Pour placer cette valeur dans une perspective significative, on peut la comparer au taux ambiant de production d'énergie par le métabolisme du rat, qui est proche de 10 mW/g dans un environnement standard. Une exposition de 60 secondes d'un animal de 300 g qui absorbe de l'énergie micro-ondes à un taux de 0,5 mW/g augmenterait au maximum sa température corporelle moyenne de 0,1 °C\*.

La méthode de dosage calorimétrique est une amélioration substantielle pour les besoins expérimentaux par rapport à la technique de mise à l'échelle traditionnelle dans laquelle la densité mesurée de l'énergie incidente sur un animal est utilisée directement comme variable indépendante ou bien pour estimer (via des règles empiriques approximatives) le dépôt d'énergie dans l'animal. Là où des erreurs de mesure supérieures à un ordre de grandeur sont possibles, et en effet probables, avec les méthodes traditionnelles de mise à l'échelle densitométrique, la technique calorimétrique a réduit l'erreur à moins de 10 %. Un psychologue, E. Hunt des laboratoires Battelle,

**\*\*Figure 4.\*\*** Diagramme schématique d'un calorimètre différentiel à double puits développé aux laboratoires Battelle. (Des mesures très précises sont faites de la quantité d'énergie micro-ondes absorbée par des modèles ou des corps d'animaux irradiés. Une cible de référence ou non irradiée est placée dans un puits, une cible irradiée dans l'autre puits ; la différence de charge thermique est ensuite détectée par des thermocouples sensibles.)

\*L'élévation maximale de température est stipulée pour l'animal anesthésié. L'animal éveillé, physiologiquement intact, qui est naïf expérimentalement au rayonnement à des densités détectables, peut présenter une élévation de température corporelle supérieure à celle uniquement attribuable au chauffage par micro-ondes. Apparemment, l'activation émotionnelle induite par une stimulation nouvelle (ou nocive) est associée à une activation métabolique, et donc à un chauffage endogène concomitant, qui s'ajoute à la charge thermique totale d'un animal irradié (Justesen, Note 5). À moins qu'il n'y ait une augmentation compensatoire du taux de dissipation de la chaleur, un animal stressé émotionnellement peut succomber d'hyperthermie pendant des traitements de rayonnement qui ne sont pas mortels pour un animal habitué, non stressé ou anesthésié (Justesen, Levinson, Clarke, & King, 1971 ; Justesen et al., 1974).

398 • MARS 1975 • AMERICAN PSYCHOLOGIST