

de type (a) la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$, et nos prévisions ultérieures se font à partir de là.

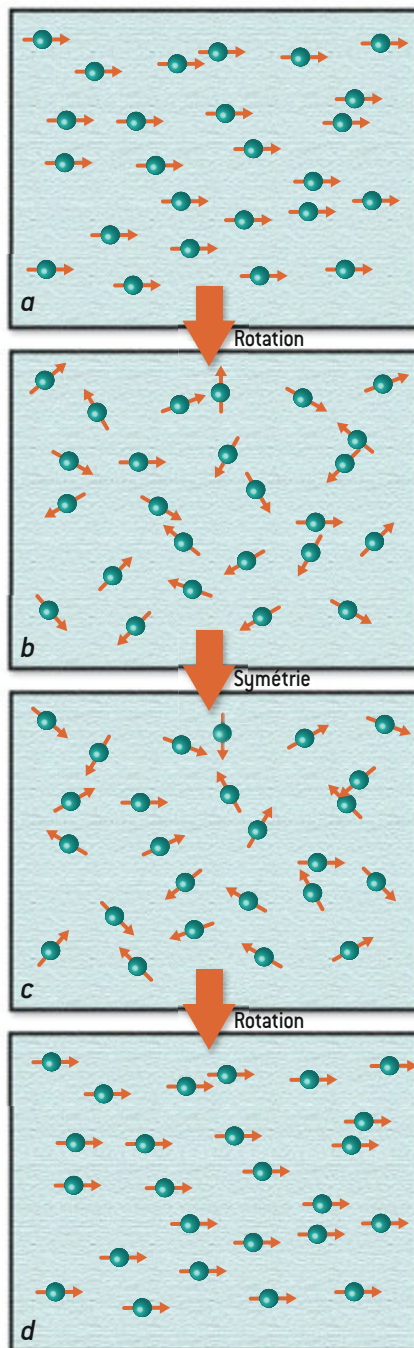
La théorie de l'information, créée en 1948 par le mathématicien américain Claude Shannon, permet de mesurer notre incertitude, c'est-à-dire la quantité d'information qui nous manque en raison du caractère probabiliste de la description ; cette quantité est proportionnelle au logarithme de la probabilité. On a pu alors montrer que l'entropie S introduite en thermodynamique s'interprète (à une constante multiplicative près) comme une mesure de notre incertitude à l'échelle microscopique lorsque notre connaissance du système se limite à ses grandeurs macroscopiques, ou encore comme notre perception du désordre.

Par exemple, l'entropie S_1 de l'état où le gaz occupe le volume A s'identifie à $S_1 = k_B \ln \Omega_1$, où $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin est la constante de Boltzmann ; cette formule, qui a clarifié la signification de l'entropie, est si remarquable qu'on l'a gravée sur la tombe de Boltzmann, à Vienne. Lorsque le gaz se répand dans le volume $A + B$, notre incertitude augmente puisque les positions des molécules sont encore moins bien précisées ; l'accroissement $k_B (\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = N k_B \ln 2$ de l'entropie mesure l'augmentation de notre incertitude. C'est en ce sens que le deuxième principe de la thermodynamique exprime la croissance du désordre.

L'observateur à son rôle

Dans l'expérience de pensée sur le gaz qui se répand dans le volume $A + B$, l'irréversibilité de l'expansion, alors que les équations microscopiques du mouvement sont réversibles, est liée à notre incapacité à renverser exactement les vitesses de toutes les molécules. Cependant, depuis les travaux de l'Américain Erwin Hahn, vers 1950, les expérimentateurs savent réaliser une opération analogue sur des systèmes particuliers, les substances paramagnétiques (voir la figure 3). Celles-ci comportent des moments magnétiques élémentaires, ou spins, qui, lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur horizontal, s'alignent dans la direction de ce champ ; le matériau est alors aimanté, situation ordonnée analogue à l'état initial de notre gaz.

La suppression brusque de ce champ laisse les spins libres de tourner indépendamment, chacun avec une vitesse bien



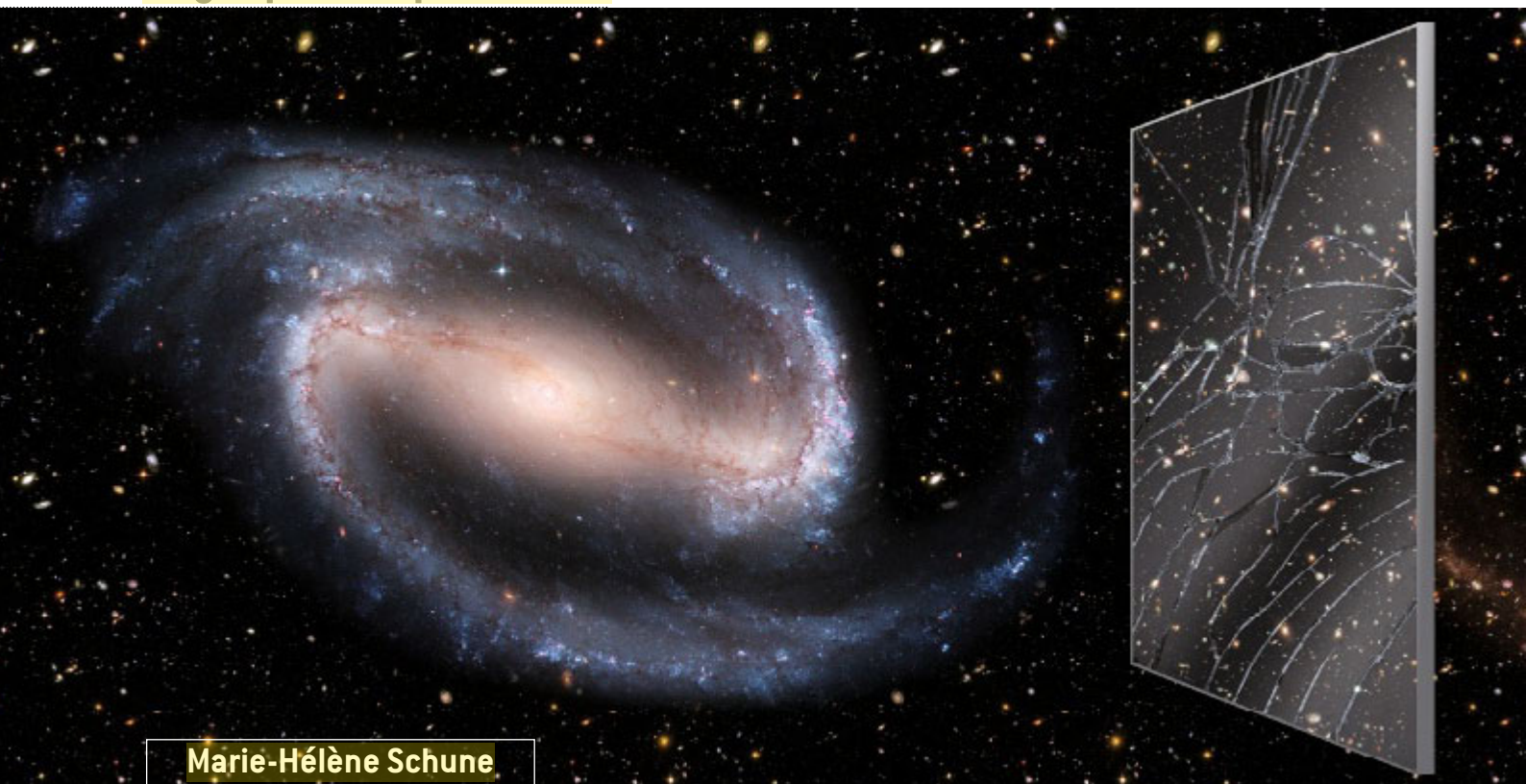
3. LES « ÉCHOS DE SPIN » sont l'un des rares cas où l'on est capable d'inverser l'évolution spontanée d'un système. L'état initial d'un échantillon de matériau paramagnétique, aimanté dans la direction horizontale du plan (a), est préparé en appliquant à l'échantillon un champ magnétique dans cette direction, qui oriente tous les spins. La suppression de ce champ laisse les spins tourner dans le plan, chacun avec une vitesse propre (sous l'effet d'un champ non homogène perpendiculaire au plan de la figure). L'aimantation a ainsi disparu au bout d'un temps T (b). Une brève impulsion électromagnétique, bien choisie, effectue alors une symétrie par rapport à l'axe horizontal de tous les spins (c). Les rotations inégales des spins les ramènent à l'instant $2T$ dans leur état initial (d).

définie qui dépend de sa position en raison de l'hétérogénéité du milieu ; la désorientation relative des spins se traduit à notre échelle par une désaimantation progressive, un processus irréversible analogue à l'expansion de notre gaz. Au bout d'une durée T , les spins pointent dans des directions qui semblent quelconques, avec une apparence de désordre.

Remarquablement, en appliquant à l'échantillon une brève impulsion de champ magnétique convenablement choisie, les expérimentateurs sont capables d'effectuer globalement sur tous les spins une symétrie par rapport à l'axe horizontal, réalisant ainsi une opération analogue au renversement hypothétique des vitesses des molécules du gaz. La rotation spontanée des spins, chacun avec sa vitesse propre, se poursuit et les ramène alors tous au bout du délai T dans leur orientation initiale : l'échantillon s'est réaimanté malgré l'absence du champ horizontal externe. On a ainsi produit un « écho de spin » : le système est revenu à son état initial comme s'il avait remonté le temps. En fait, l'observateur savait que l'état désaimanté présentait un ordre caché, car il était issu de l'état aimanté, et il a réussi à tirer parti de cette information. Les échos de spin sont devenus une technique courante en imagerie par résonance magnétique.

Une idée similaire est exploitée en acoustique par Mathias Fink et son équipe à l'ESPCI (École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris). La diffusion par un objet complexe d'ondes ultrasonores originellement émises par une source simple est un processus à première vue irréversible, car les ondes diffusées ont une apparence aléatoire. Imaginons cependant que l'on entoure l'objet diffuseur de capteurs pouvant détecter et enregistrer les signaux reçus, puis émettre une onde identique mais variant en sens inverse dans le temps, les premières oscillations émises reproduisant les dernières reçues. Cela permet d'effectuer un « retournement temporel » des ondes ultrasonores, qui convergent alors vers l'objet en reproduisant à l'envers les ondes divergentes originales.

Une telle focalisation, produite en dépit de l'hétérogénéité du milieu diffuseur, est à la base de techniques innovantes notamment pour briser des calculs rénaux ou pour détecter des tumeurs. Voilà un exemple remarquable d'application d'un renversement de la flèche du temps !



Marie-Hélène Schune

Du sens du temps à la viola

Pour les particules subatomiques, passé et futur sont indifférents... ou presque. Cette légère asymétrie par rapport au sens du temps est liée à une autre asymétrie, entre particules et antiparticules, qui fait l'objet de recherches actives.

L'Univers ne contient quasiment pas d'antimatière. Quel est le rapport entre la matière, l'antimatière et l'écoulement du temps ? On le voit mal, du moins à notre échelle et à l'échelle cosmique. Toutefois, les physiciens en ont découvert un à l'échelle microscopique.

Les interactions entre les particules élémentaires qui composent la matière sont décrites par une théorie dont la version la plus élaborée et la mieux testée aujourd'hui est nommée modèle standard. Ce dernier a d'abord été construit de façon à ce que les particules de matière et les particules d'antimatière y jouent le même rôle. Mais les constatations se sont accumulées : cette symétrie n'est pas respectée dans la nature, et il a fallu en tenir compte.

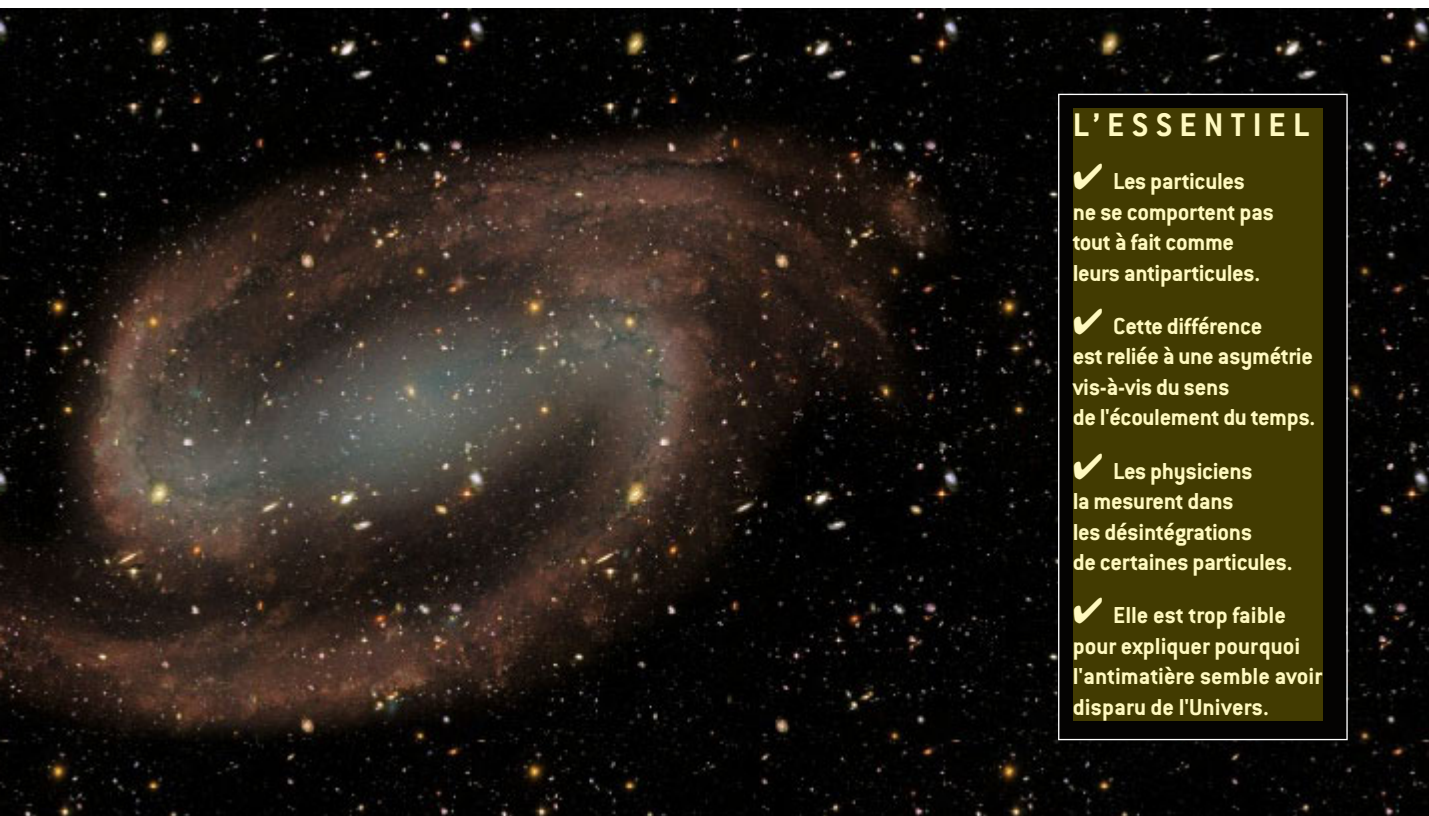
Pour autant, la description théorique obtenue aujourd'hui est incapable d'expliquer le déséquilibre extrême constaté dans l'Univers entre matière et antimatière. Or, comme nous allons le voir, ce

déséquilibre a un rapport direct, mais énigmatique, avec l'écoulement du temps...

Le modèle standard est conçu pour rendre compte des interactions des particules élémentaires, telles que les physiciens les constatent dans les accélérateurs. L'un de ses principes essentiels est de respecter des symétries. On nomme ainsi des transformations mathématiques passant d'une description des particules à une autre et qui laissent invariante la forme des équations.

Lorsque les mesures confirment qu'une telle invariance est respectée, les physiciens disent que la symétrie est conservée. Sinon, ils la disent violée. Or la symétrie qui permet de passer d'un processus mettant en jeu des particules au processus analogue mettant en jeu leurs antiparticules se révèle violée. Expliquons cela.

L'idée que les lois de la physique doivent rester invariantes sous certaines trans-



L'ESSENTIEL

- ✓ Les particules ne se comportent pas tout à fait comme leurs antiparticules.
- ✓ Cette différence est reliée à une asymétrie vis-à-vis du sens de l'écoulement du temps.
- ✓ Les physiciens la mesurent dans les désintégrations de certaines particules.
- ✓ Elle est trop faible pour expliquer pourquoi l'antimatière semble avoir disparu de l'Univers.

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team, Pour la Science

tion de la symétrie CP

formations est ancienne. C'est au début du XX^e siècle que les principales étapes ont été franchies vers la compréhension de l'importance cruciale que jouent les symétries dans la construction des théories physiques. Il est apparu que les transformations entre les descriptions différentes d'un système physique (par exemple un ensemble de particules) forment des ensembles mathématiques nommés groupes.

Une asymétrie discrète

Par exemple, au groupe des translations dans l'espace est associée l'invariance des équations de la physique par translation du référentiel (on déplace le système de coordonnées); cette invariance se traduit par la conservation de la quantité de mouvement du système considéré. De même, l'invariance des lois physiques par rapport au groupe des translations dans le temps (consistant à décaler l'échelle de temps) se

traduit par la conservation de l'énergie du système considéré.

Certains groupes de transformations sont qualifiés de discrets, car ils comportent un nombre fini d'éléments: on parle alors de symétries discrètes. Ces dernières sont particulièrement utiles en physique des particules, car elles ont pour conséquence la conservation de caractéristiques désignées sous le nom de nombres quantiques (par exemple la charge électrique ou le spin, moment cinétique intrinsèque des particules). Les nombres quantiques associés aux symétries discrètes ne peuvent prendre que certaines valeurs, entières ou fractionnaires. Les symétries discrètes qui nous intéressent ici sont les symétries C, P et T, notées ainsi pour rappeler les opérations concernées.

—La première opération, C, est la transformation des particules en antiparticules, que l'on nomme aussi conjugaison de charge: si la symétrie C est respectée, les

prédictions (probabilistes) relatives aux résultats d'une expérience réalisée avec des particules sont les mêmes que celles relatives à l'expérience identique où toutes les particules en jeu sont remplacées par leurs antiparticules (électrons remplacés par positrons, neutrons remplacés par anti-neutrons, etc.).

— La deuxième opération, P, est la parité, qui consiste à inverser les trois axes de coordonnées d'espace. Elle équivaut à une symétrie miroir accompagnée d'une rotation. Si la symétrie P est respectée, les résultats d'une expérience devraient être les mêmes lorsqu'on inverse les trois axes d'espace. Cela signifie que pour des

1. IL EXISTE DANS L'UNIVERS une gigantesque asymétrie entre la matière et l'antimatière: les galaxies n'ont pas d'antigalaxies associées, sortes d'images dans un miroir, comme représenté ci-dessus. La situation est totalement différente à l'échelle des particules, où cette asymétrie est minuscule et liée à celle du temps.