

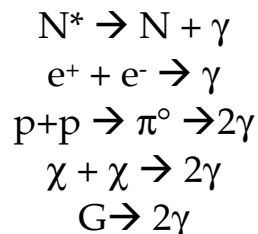
# ASTRONOMIE GAMMA , MICROCOSME ET DIMENSIONS SUPPLEMENTAIRES

*Michel Cassé*

Service d'Astrophysique  
Institut d'Astrophysique de Paris

*Lien dialectique entre physique et astronomie*

Le but de ce cours est d'établir une connexion entre univers, galaxies, étoiles, noyaux, particules, interactions et nombre de dimensions de l'espace, par le truchement de la physique de l'infime, depuis la plus connue (noyaux et particules) jusqu'à la plus spéculative (supercordes). Le trait d'union, le messenger, le Mercure, sera le photon gamma car (1) il est observable par le truchement de détecteurs spécialisés (spatialisés), (2) il est omniprésent, ubiquitaire : particule de prédilection de la physique nucléaire, de la physique des particules, il nous relie au microcosme et (3) il sert de révélateur à l'antimatière, et éventuellement à la matière noire supersymétrique ainsi qu'à d'éventuelles dimensions supplémentaires par le biais du graviton massif (de Kaluza-Klein) dont il est le produit de désintégration.



L'astrophysique est un champ de pensée qui met la physique à la disposition des astres, ou plus exactement à la leur compréhension. Cette association, fonctionnant dans le sens physique  $\rightarrow$  astronomie, est particulièrement fructueuse, car elle offre des réponses à des questions immémoriales aussi bien qu'actuelles: pourquoi (comment) le Soleil brille, quelle est son espérance de vie et celle de chaque étoile particulière ? Quelle est l'origine et évolution des atomes ? Quel est le fruit de l'explosion de l'univers et des astres (nucléosynthèse primordiale et stellaire). Quel est le mode de production et le devenir des objets compacts, naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs etc...?

Il est maintenant souhaitable d'inverser cette dialectique et de mettre l'astronomie au service de la physique nouvelle, de faire du cosmos un laboratoire afin de tester les théories les plus ambitieuses de la physique, afférente à l'unification conceptuelle des interactions fondamentales (forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle), dont l'archétype est l'unification électrofaible, imaginée par Glashow et Weinberg, et vérifiée au CERN par Rubbia et ses collaborateurs.

En toute théorie, l'unification forte- électrofaible (« grande unification »), et celle de la gravité avec les trois autres forces coalisées (« unification ultime ») sont hors de portée des accélérateurs de particules et des collisionneurs les plus puissants<sup>1</sup>.

*<sup>1</sup>Masse de Planck*

Rayon quantique (Compton) = Rayon gravitationnel (Schwarzschild)

Calcul du rayon Quantique

$\Delta E \cdot \Delta t = h'$  (relation d'incertitude) ou onde associée de de Broglie avec  $v = c$

$$\lambda = h/mc$$

Calcul du rayon Gravitationnel

Vitesse de libération =  $c$

$$1/2 c^2 - Gm/r = 0 \rightarrow r = 2Gm/c^2$$

On déduit les longueur, temps, énergie, température, densité associées

En utilisant les règles de conversion usuelles

$$\Delta E \cdot \Delta t = h'$$

$$l = ct$$

$$E = mc^2$$

$$E = kT$$

Les valeurs que l'on obtient, dans les unités appropriées, sont :

Energie de Planck :  $10^{19}$  GeV

Temps de Planck :  $10^{-43}$  s

Longueur de Planck :  $10^{-33}$  cm

Température de Planck :  $10^{32}$  K

Densité de Planck :  $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>

$$h/mc = 2Gm/c^2$$

La valeur extrême de ces nombre ruine tout espoir de les atteindre expérimentalement.

Le seul moyen d'accéder aux énergies extrêmes où sont censées se réduire les fractures entre les forces est céleste et cosmique. Par un juste retour des choses, les astres sont mis au service de la physique. L'univers devient un vaste laboratoire de haute température (énergie) et densité<sup>1</sup>, mais pour bien l'utiliser, il convient de le comprendre.

<sup>1</sup>Big-bang :  $T(K) = 10^{10}/\sqrt{t}$ ,  $\rho$  (g cm<sup>-3</sup>) =  $10^6/t^2$

Proto- étoiles à neutrons et Supernovae :  $T = 10^{11}K$ ,  $\rho = 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>

## *Univers physique*

L'histoire du ciel et la métamorphose stellaire et cosmique de la matière sont devenus des thèmes essentiels de recherche pour les sciences. La découverte de l'expansion de l'univers par Edwin Hubble et du Rayonnement Cosmologique Fossile par Penzias et Wilson, donnant corps aux modèles cosmologiques issus de la relativité générale d'Einstein, accèdent la thèse d'un univers déployé à partir d'un big-bang et dont l'histoire est celle d'un refroidissement et d'une dilution généralisée sous l'effet de l'expansion de l'espace, avec des exceptions locales : étoiles et galaxies. L'univers ne peut être conçu sur le modèle de la chose, c'est un ordre à retrouver, et cet ordre est temporel. L'univers est un roman, tout autant qu'une cosmographie. Le ciel n'est pas un théâtre vide. L'univers lui-même est rentré dans l'histoire, de ce fait, il n'y a plus de garant de l'éternité.

La cosmologie physique et observationnelle moderne qui tire partie d'imperceptibles rougeurs sur le fond du ciel, compare la géométrie de l'univers réel à celle d'un modèle idéalisé, sphérique, euclidien ou hyperbolique. Pour toiser l'univers, se sert des *supernovae*, événements extrêmement lumineux associés aux explosions d'étoiles, comme jalons. Elle en conclut que l'univers, à grande échelle, est de *courbure nulle*, et donc que les trois directions de l'espace sont droites, comme les lignes des cahiers d'écoliers, et que *l'expansion de l'espace intergalactique s'accélère*. C'est là une révolution dont nous sommes encore loin de saisir toutes les conséquences.

## *Atomes, matière noire et quintessence*

Cosmos, quel est ton être ? quel est le souffle qui enfle ta bulle ? quel est ta chair ? La conviction que tout dans l'univers observable était atome (baigné de neutrinos indifférents...) était fermement établie jusqu'au jour où on vint à réaliser deux choses : La première est que la gravitation des galaxies et du gaz qui les baignent était insuffisante pour assurer la bonne tenue de leur communauté. Quelle que chose de sombre ou d'invisible prêtait main forte à la matière brillante ! La cohésion sociale ne pouvait être assurée que par une forme *non lumineuse* et majoritaire de surcroît, présente dans les amas de galaxies sinon dans l'univers entier. La seconde est que l'expansion de l'univers, contre toute attente est en train de s'accélérer. L'agent de cette accélération, substrat inusité de

pression *négative*, selon les premières analyses et marquée du sceau  $\Lambda^1$ , est nommé, provisoirement, *quintessence*, avec un sourire entendu.

<sup>1</sup> La lettre grecque  $\Lambda$  est le signe de la constante cosmologique, qu'Einstein a glissé dans ses équations pour stabiliser l'univers, avant que Hubble ne découvre son expansion.

A côté de la matière atomique (nucléaire), moins commune qu'il n'y paraît, il convenait donc de supposer l'existence d'une ou plusieurs formes de substances *invisibles*, indétectables par leurs effets lumineux, et dont la seule vertu est d'attirer et de contenir la matière lumineuse dans des limites étroites, ou au contraire de repousser les galaxies. Le principe qui vaut ici est que l'incapacité de rayonner n'équivaut pas à une absence absolue, comme en témoigne la poigne gravitationnelle ou antigravitationnelle de ces substances-là.

### *Naissance d'univers*

Renversant la course du temps et de l'expansion, le modèle aboutit à un état initial, infiniment dense et chaud et il place « l'émergence de l'univers » à 13.7 milliards d'années du commun des mortels. Folie pour les rationalistes, la question du *commencement* ne s'éteint pas. Les notions explosives de big-bang et d'inflation cosmologique qui lui donne source résonnent en écho à la violence même de la question des origines. Le récit scientifique de la genèse prend la forme suivante : le premier état de nature c'est le *vide quantique* (plein de toutes les naissances), et celui-ci est de nature expansive. La dilatation n'entame pas sa densité d'énergie. Sa pression est négative. De ce fait, c'est un redoutable écarteur d'espace<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>L'équation d'accélération de l'univers prend la forme suivante

$R''/R = -4/3 \pi G(\rho + 3p)$ , où  $R$  est le facteur d'échelle de l'univers,  $R''$  sa dérivée seconde par rapport au temps,  $\rho$  la densité d'énergie moyenne de l'univers et  $p$  sa pression.

Et l'espace ne peut que se donner en abondance. Le père de l'étendue c'est donc le vide. Et lorsqu'il eut écarté l'espace suffisamment pour y loger un univers, le vide souffla le feu dans cette bulle, et expira d'épuisement. La lumière se transforma en matière et antimatière.. etc...Ceci en de multiples exemplaires, on ne peut s'empêcher de le penser. Enfin, bien plus tard, naquirent les étoiles qui accouchèrent des atomes. La lumière fut par rapport au vide ce que la fille est par rapport au père. J'appelle Univers l'ensemble des cosmos.

## *La chair du monde*

L'atome tient une place insignifiante dans le bilan du monde (quatre pour cent). Pire, la matière qui brille, en majeure partie sous forme d'étoiles, ne constitue que cinq millièmes du contenu substantiel de l'univers. La partie majeure du cosmos est par conséquent *invisible*, c'est à dire lumineusement inexpressive. L'unité de la matière, retrouvée dans le calme et la profondeur de la réflexion théorique séculaire a explosé et la cosmologie en est toute éclaboussée. L'atome, dont on proclamait la suprématie depuis l'aube de la science et de la philosophie est relégué au troisième rang derrière la « l'énergie noire » et la « matière noire ». Le triomphe de l'atome universellement proclamé par Newton, Bohr et les quantiques, de *l'atome qui brille* et illumine le monde, est donc aujourd'hui farouchement contestée par l'école cosmologique. Comment en est-on venu à accorder à l'invisible et à la matière non atomique la première place par ordre de densité d'énergie? par l'observation et la logique. L'atomisme que l'on enseignait dans les écoles comme doctrine définitive, ne recouvre qu'une partie congrue de la réalité matérielle. La matière atomique déclare par notre bouche son insignifiante cosmique. L'atome n'est que l'écume de la matière, sa pointe expressive. La matière dont nous sommes faits est céleste (ses sources sont les étoiles), expressive (elle brille) et précieuse (elle ne constitue qu'une très faible partie de l'univers). L'univers est essentiellement constitué de matière noire, non atomique et d'énergie invisible (quintessence). Le partage s'établit ainsi : matière atomique 5%, matière noire non atomique 30% et tout le reste est quintessence ou " vide quantique ". La matière, qu'elle soit faite d'atomes ou non, par définition exerce une gravitation attractive. La quintessence, en revanche, a des vertus répulsive. Elle accélère l'expansion de l'univers. Les nouveaux venus dans la cosmologie, matière noire et vide quantique se taillent la part du lion. L'histoire du cosmos (de notre bulle cosmique) se divise en plusieurs ères, Vide Quantique, Lumière, Matière et Quintessence. La première et la dernière ère sont dominées par la gravitation répulsive, symbolisée par  $\Lambda$ , mais elles ne se confondent pas. Les ères sont de durées très inégales : respectivement  $10^{-34}$  s, 380 000 ans, 10 milliards d'années, infinie.

## *Inflation cosmologique et plurivers*

Le monde est un système de champs en interaction. Au côté des champs vectoriels, spinoriels, tensoriels, de spin 1, 1/2 et 2 respectivement, prend place un champ (ou plusieurs) scalaire, c'est à dire de spin nul. Les champs sont attractifs ou répulsifs selon leur spin. Celui-ci est purement répulsif.  $\Lambda$ , *constante cosmologique*: Etant constant dans l'espace et le temps, ce type de champ n'est fonction ni de l'espace ni du temps. Fonction ni de  $x$  ni de  $t$ , il est invariant de Lorentz. Cet éther est relativiste !

Clapotis vaporeux : une bulle s'élève, émergeant du brouillard d'espace-temps. Elle est chargée d'un fort champ  $\Lambda$ . Elle entre aussitôt en expansion et crée son propre espace. Puis, soudainement, le champ se transmute en autre chose que lui même. Lumière ! big-bang !

L'inflation est une lampe d'Aladin conceptuelle dont sortent des univers à l'histoire complexe et chatoyantes, équipés de différentes constantes cosmologiques. Le poseur de bombe universel, le voilà démasqué : c'est le vide, écarteur d'espace, père de la lumière et de la matière dont les fluctuations, les hoquets seront des légions de galaxies.

### *Gravité quantique*

Pour Einstein et ses disciples, la gravitation n'est donc autre que l'espace-temps lui-même s'exprimant dans toute sa souplesse, (sa courbure, son écart à la droiture). Et quantifier la gravitation revient à quantifier l'espace-temps et non plus les objets qui le jonchent. Cette esquisse du programme de gravité quantique nous laisse désirant d'en découdre, ou plutôt de coudre la gravité au drap des autres forces de la nature. Mais nous devons éteindre notre impatience, car il y a loin de la coupe de l'espace-temps aux lèvres matérielles. Et il faudra une longue préparation pour enfin se permettre de dire le premier mot du langage de la Gravitation Quantique et toucher à son unification avec les autres interactions de la physique. Longue est la quête des origines et les embûches nombreuses. Mais revenons aux fondements.

### *Modèle standard de la physique des particules*

Les fermions, impénétrables, constituent la chair du monde. Individualistes forcenés, les quarks et les leptons refusent de voir réduire leur espace vital et s'opposent de toutes leurs forces à la contraction. L'existence des naines blanches et étoiles à neutrons repose sur la

résistance des électrons et des neutrons respectivement. Les bosons, grégaires et aptes à collaborer, à unir leurs forces, sont le ciment du monde, ils mettent en relation les fermions entre eux. Le modèle standard requiert 12 convoyeurs de force différents :

8 gluons  
3 bosons intermédiaire  
1 photon

Particules ancillaires et liantes, les bosons conjuguent leurs forces pour bâtir des structures de différents niveaux de complexité. Les quatre forces, véhiculées par une escadrille de bosons, structurent le monde et s'entrecroisent dans le Soleil et les étoiles. La lumière et les neutrinos transportent l'information d'un point à l'autre de l'univers.

Les particules, d'une certaine manière, se définissent par rapport à leur sensibilité aux différents types de forces. Toutes sont sensibles à l'interaction gravitationnelle, en ceci elle peut être dite universelle. Les neutrinos ne sont chatouilleux à l'interaction faible et à la gravitation. Les électrons à électromagnétique, faible et gravitationnelle. Les quarks et leur assemblages, aux quatre.

Exemple : un proton, au centre du Soleil dispose de plusieurs possibilités, qui sont autant de manières d'être. Il est sous l'influence de la gravitation, puisqu'il ne s'envole pas. Il est sensible à l'interaction forte, puisqu'il peut se lier à un autre proton. Il peut se transmuter en neutron en émettant un positon et un neutrino. C'est cette versatilité élémentaire, ce luxe de possibilités, qui donne à Phébus au crins dorés sa parure et sa longévité. Avec le Soleil et les étoiles, la nature se dote d'un merveilleux équilibre dynamique. Avec le photon, elle se donne la possibilité de le faire connaître.

### *Spin*

Le spin est un nombre : les particules arborent un insigne spécial, appelé spin, s'affublent de ce spin, qui devient un indice de distinction, un galon, une médaille, un drapeau, un oriflamme. Ce spin est un nombre. Ce nombre peut être entier ou demi entier. Selon que les particules arborent un spin entier ou demi- entier, les particules marquent une tendance grégaire ou au contraire, un franc individualisme<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>La raison de ce comportement est obscure et son explication ne peut être abordée que dans le cadre de la théorie quantique des champs.

Il suffira ici de conserver en mémoire que les particules de spin demi entier ( $1/2$ ) sont appelées *fermions* et *bosons* les particules de spin entier. Cette division est fondamentale, car les fermions, d'ordinaire sont ce que nous pouvons appeler les particules de matière et les bosons, les particules de champ. Les secondes servent de messagers, d'intermédiaire aux premières. Les particules ancillaires (bosons de leur état) transportent les forces de l'une à l'autre particule de matière. Le caractère impénétrable de la matière se voit ici expliqué (par le principe d'exclusion de Pauli).

Le spin, en vérité, est un attribut de rotation. Paradoxe, comment une particule ponctuelle peut-elle être dotée de spin ? Cette contradiction est levée si l'on imagine que les particules sont des minicordes, des structures allongées, filiformes. Elles peuvent alors être douées d'un moment angulaire ( $mvr$ ). Nous voyons ici, le plus simplement du monde, que l'extension ne nuit pas à la clarté, mais bien au contraire.

### *Champs et spin*

Les points de l'espace-temps sont les épingles à linge qui servent à étendre le champ. Les champs disposent de toute l'étendue. Le monde est un système de champs quantiques en interaction, comprenant des champs de spin  $2$ ,  $1$ ,  $1/2$  et  $0$ . Les labels entiers  $2$ ,  $1$  caractérisent et même définissent le genre boson. Le label  $1/2$  le genre fermion. Aux fermions s'applique le principe d'exclusion. Les particules fondamentales de spin  $0$ , encore hypothétiques sont destinées à jouer des rôles éminents en physique des particules (bosons de Higgs) et en cosmologie (champ scalaire, quintessence). Le spin  $3/2$  manque à l'appel. Cet orifice, c'est la supersymétrie qui le comble, comme nous le verrons plus loin.

Le modèle standard de la physique des particules est le cadre conceptuel qui recouvre toutes les connaissances et les expériences rassemblées sur les particules et leurs interactions depuis l'origine de cette discipline.

Le modèle qui la résume est fondé sur la théorie quantique des champs, pour laquelle l'archétype des interactions est électromagnétique : deux électrons échangent un photon (virtuel). La représentation picturale de l'interaction est la suivante :

Figure ...Diagramme de Feynman

Tableau des particules et des interactions



Bosons et fermions  
Quarks et leptons  
Constantes de couplage

La théorie quantique des champs admet trois types de champs, caractérisés par leur spin (scalaire spineur, vecteur et tenseur, c'est - à- dire de spin 0, 1/2, 1 et 2)). Les particules « virtuelles » servent de liant aux particules réelles.

De même pour les autres interactions : les fermions (matière) sont mis en relation par des bosons (vecteurs de forces). Les particules messagères des interactions faible, forte et gravitationnelle sont les bosons W et Z, les gluons (de masse nulle) et les hypothétiques gravitons. Chaque force (interaction) se caractérise par une portée (liée à la masse du messenger) et une intensité (constante de couplage de l'interaction incriminée). Les constantes de couplage, mesurant l'intensité des diverses forces, sont très disparates dans les conditions ambiantes. Pourtant le « vide » (absence de particules réelles) acquiert d'étranges propriétés (densité d'énergie, polarisation, effet d'écran), ce qui se solde par une variation théorique de l'intensité des forces en fonction de l'énergie, et laisse imaginer une unification des forces à très haute énergie.

*Symétrie de jauge locale*

Le trait commun des 3 interactions, qui suscite l'espoir de leur unification (conceptuelle) est que s'appliquent à elle une description commune dite symétrie de jauge. Ce principe fondamental, fortement unificateur, qui relativise les conventions (phase, saveur, couleur), et donne à la physique une grande objectivité, implique, en substance que les champs de jauge (messagers) sont de masse nulle, ce qui convient parfaitement aux photons, gluons (et également aux gravitons), mais entre en contradiction frontale avec le fait avéré que les bosons de l'interaction faible sont très massifs. Le plus grand succès du modèle standard est l'unification électrofaible est à la fois sa faiblesse (brisure spontanée de symétrie) qui autorise l'espérance d'une « grande unification » forte-électrofaible, qui mettrait les leptons et les quarks (LQ) sur un pied d'égalité. Or les bosons W et Z de l'interaction faible sont très massifs (100 GeV), alors que le photon, messenger de l'interaction électromagnétique est dépourvu de masse. La symétrie de jauge est sujette à brisure spontanée de symétrie par le biais du mécanisme de Higgs (champ scalaire). Brillante idée qu'il convient de vérifier pour accréditer l'entièreté du Modèle Standard de la physique des particules et clore la chapitre du microcosme. Pourquoi ne se contente -t-on pas du modèle canonique ? Que lui manque-t-il ? Trouver la particule pour le

compléter et déclarer la physique close ? Cela semble notoirement insuffisant.

### *Insatisfaction*

Les raisons pour lesquelles on ne peut se satisfaire du Modèle Standard de la physique des particules sont à la fois conceptuelles (profondes) et phénoménologiques (factuelles).

(1) L'évolution calculée des couplages effectifs fait signe vers une unification des forces électrofaible et forte aux alentours de  $10^{15}$  –  $10^{16}$  GeV, mais la convergence n'est pas parfaite. Susy, la **Supersymétrie**, (mettant son grain de sel, ou plutôt sa pincée de particules) améliore considérablement la situation, et la convergence se produit à  $10^{16}$  GeV. A 1000 GeV plus loin serait le paradis de l'Unification Ultime (UU), et on s'autorise à imaginer une théorie de toutes les interactions.

(2) Du point de vue phénoménologique, le Modèle Standard ne donne aucune explication convaincante de la masse des neutrinos (solaires et atmosphériques), de l'asymétrie Matière- Antimatière et de la matière noire. Et par dessus tout, nous écopons du terrible problème de la constante cosmologique: l'énergie du vide cosmologique est en désaccord flagrant avec celui du vide de la théorie quantique des champs. Le modèle des particules et forces se doit donc d'être amendé, mais le prix à payer est élevé. La théorie des supercordes (cordes supersymétriques) apte à unifier la gravité et les forces quantiques nécessite des *dimensions supplémentaires*. (espace-temps 10 d, donc 6 d supplémentaires) .

### *Supersymétrie*

La supersymétrie fait correspondre à chaque particule un « clone » de spin accru ou diminué d'une demi – unité. Au quarks et leptons, correspondent squarks et sleptons (selectrons et sneutrinos), aux bosons sont associés photinos, winos, zinos et gravitinos. On dit la supersymétrie brisée car les masses des sparticules sont bien supérieures à celle des particules, sinon elle aurait été découverte depuis longtemps. La principale vertu de la supersymétrie est l'unification des trois interactions de jauge à un énergie commune de  $10^{16}$  GeV. Sa principale faiblesse est qu'aucune des sparticules prédites n'a encore été découverte. Est-ce faute d'énergie ? Le grand collisionneur LHC du CERN devrait y pourvoir.

A l'appel des champs, une seule absence est à déplorer: le champ de spin  $3/2$  et la particule qui lui est associée. Il convient de combler cette lacune. Nommons un mathématicien spécial pour venir à bout du problème et démontrer la nécessité fondamentale de l'existence d'une particule de spin  $3/2$ . Exhortons les expérimentateur à découvrir la particule qui lui est associée. Ainsi nous fonderons la supersymétrie. Le spin n'est plus un absolu, puisqu'on peut passer d'une valeur de 0 à 2 par sauts continus de  $1/2$ . Tous les spins se valent désormais. La supersymétrie unit les particules de tous spins. Elle comble de surcroît une case ( $3/2$ ): gravitino. Le grand principe démocratique de l'égalité (équivalence) de toutes les types de particules vient élargir le monde et lui conférer justice et démocratie au niveau le plus infime, c'est à dire le plus fondamental. La supersymétrie et la symétrie C (conjugaison de charge) ne multiplient pas le nombre de particules fondamentales, mais déclinent les versions d'une seule et même entité.

Ainsi, par exemple, l'électron se décline en antiélectron et en sélectron (le sélectron est sa propre antiparticule). C'est comme si on tendait deux miroirs à la nature, perpendiculaires l'un à l'autre. Les particules et leur image dans les miroirs ont égal droit à l'existence, mais leur stabilité n'est pas garantie. On est forcé d'admettre que le sélectron n'est pas de même masse que l'électron, sinon on l'aurait découvert. On dit que la supersymétrie, responsable et garante de son existence, est brisée. Le mécanisme de la brisure n'est pas totalement élucidé, nous ne connaissons même pas l'énergie où prend effet cette césure.

Hypothétiques ou polémiques, les êtres physiques les plus évanescents sont venus honorer la physique de leur présence – absence, neutrinos, neutralinos, quintessence du neutre, à quand les neutralissimos ?

Particule estimée entre toutes, le neutralino, n'est pas une particule simple, c'est une superposition linéaire, au sens quantique du terme, de trois états (bino + wino + higgsino). Réputé comme la particule supersymétrique la plus légère, il se doit d'être stable. Sa masse serait considérable ( au moins 100 fois celle du proton). Il constitue un candidat très en vue au titre de matière noire. Sensible uniquement à la gravitation, ils seraient concentrés au voisinage du Trou Noir géant ( $10^6 M_{\odot}$ ) qui gîte au centre de notre galaxie. Etant sa propre anti-particule, le neutralino s'annihilerait avec son semblable, donnant naissance à des rayons gamma et des positons, lesquels s'annihileraient, à leur tour avec les électrons ambiants. Les neutralinos se trahiraient-ils par leur annihilation au centre de la galaxie, source de rayons gamma. C'est ce

que nous allons voir en recherchant les indices de cette effusion de rayons gamma sur les cartes des régions centrales de la Galaxie.

### *Extraparticules*

Nous assistons aujourd'hui à une extension considérable du concept d'espace et de celui de matière, auquel personne ne peut rester indifférent. Le nombre de dimensions de l'espace n'est pas celui que l'on croit, en effet l'harmonie physico - mathématique, ou si l'on préfère la réconciliation de la gravité avec les interactions forte, faible et électromagnétique s'effectue dans un espace temps à 10 voire 11 dimensions, si l'on en croit les théoriciens des cordes et membranes.

Les particules fondamentales du Modèle Standard (quarks et leptons d'un côté et bosons de l'autre) se voient dupliquées et reliés par une symétrie d'ordre supérieur. À côté de l'antimatière, aujourd'hui totalement intégrée dans la physique et si bien comprise que l'on puisse en créer, prennent place des entités encore hypothétiques comme les *superparticules* (neutralinos et consort) et les *extraparticules* (particules de Kaluza-Klein, issues des extradimensions (jusqu'à 7 si l'on en croit la théorie M, mère des supercordes).

Du point de vue conceptuel la faille la plus profonde du Modèle Standard de la physique des particules est que la gravitation (quantique) n'est pas incluse dans le modèle et que le problème de la hiérarchie n'est pas résolu : rien n'explique la différence de masse entre masse de Planck et masse d'unification électrofaible. Les deux problèmes sont reliés car le jour où nous disposerons d'une théorie quantique de la gravitation, nous comprendrons la *faiblesse de la gravité par rapport à l'interaction électrofaible*. La différence entre l'échelle électrofaible (~1 TeV) et celle de Planck (gravitation quantique) est vertigineuse. Ou plus simplement la gravité est extraordinairement faible comparée à la force électromagnétique (on peut contrebalancer le champ gravitationnel de la Terre avec un simple aimant). Pourquoi ?

### *Quintessence du réductionnisme*

Une réponse originale et inattendue à cette énigme de l'aimant et de la Terre a été avancée : *la gravité est faible parce qu'elle se dilue dans les dimensions d'espace supplémentaires*. Le nombre de dimensions

supplémentaires est fixé par la théorie des supercordes (10) & membranes (11).

Mais toute modification théorique de grande ampleur suscite généralement la possibilité d'existence de nouvelles particules (exemple : antimatière, et particules supersymétriques). En l'occurrence la gravitation devient forte au dessus de l'énergie 1 TeV. L'unification ultime des 4 force se produirait à cette énergie, car dans ce cas l'échelle de Planck (multidimensionnelle) et l'échelle électrofaible se confondraient. La gravitation égalerait en intensité l'interaction électromagnétique au dessus de 1 TeV. Le faible serait fort. Le lion paîtrait avec l'agneau. Ci fait, mais si l'espace, contrairement à l'apparence dispose de plus de trois dimensions. Quelle en sont les conséquences<sup>1</sup> ?

<sup>1</sup>Cette ligne de pensée est inspirée de la conjecture de Théodore Kaluza et Félix Klein, qui dans les années 1920, tentèrent d'unifier l'électromagnétisme et la gravitation dans une théorie purement géométrique étendant à cinq dimensions la relativité générale d'Einstein. Aujourd'hui, cette vision est reprise dans le cadre de la théorie des supercordes et de la théorie M qui les unifie.

(1) La loi de l'interaction gravitationnelle serait modifiée :  $1/r^2 \rightarrow 1/r^3$  s'il existe une cinquième dimension. Notez que la loi de Newton (force inversement proportionnelle à l'inverse du carré de la distance) n'est vérifiée que pour des distances supérieures à 0.1 mm, ce qui laisse ouverte la possibilité de déviations à petite échelle par rapport cette loi.

(2) La masse de Planck étant ramenée à plus basse énergie, en l'occurrence à  $\sim 1$  TeV, la gravitation est forte au dessus de cette énergie, où les effets de la gravitation quantique se feraient sentir dès 1 TeV, environ. Si tel est le cas, les collisions entre particules ourdies par les physiciens devraient se solder par la création de micro trous noirs par le collisionneur LHC, au CERN .

(3) cette théorie devrait se prêter à la vérification astrophysique, car il existe des sites de température et densité suffisantes pour que se manifestent les effets de cette nouvelle théorie, à savoir le big-bang (plus précisément la fin de l'inflation cosmologique) et les supernovae.

### *Emergence dans notre monde de légions de gravitons massifs*

Figure IV Progression du graviton dans un espace-temps à 5 d.

Pourquoi ne se fait-elle pas ressentir, passe-t-elle inaperçue ? Parce qu'elles sont enroulées (seulement accessibles à la gravité). Mais si elles sont enroulées, alors les gravitons apparaissent comme massifs ( $\lambda = h/mc$ )

Le graviton de masse nulle circule dans l'espace à 4d à la vitesse  $c$ , comme l'impose la relativité restreinte. Mais de notre point de vue 4d, dans la mesure où il fait des boucles dans la cinquième dimension et les suivantes, il se propage à une vitesse inférieure à celle de la lumière ( $v < c$ ). Tout ce passe comme si le graviton était doté d'une masse, ou plus exactement comme s'il existait des gravitons de masses étagés, correspondant à un circuit de 1, 2,3...n, tours dans les extradimensions. Une légion de gravitons massifs (de masses étagées) apparaissent de notre point de vue quadridimensionnel. La gradation des masses  $m, 2m, 3m, 4m...$ etc, est très spécifique au phénomène, et la valeur de  $m$  dépend de  $R$ , le rayon des extradimensions :  $m$  est inversement proportionnel à  $R$ . Ceci on le comprend si l'on veut bien (1) se souvenir de la formule de de Broglie :  $\lambda = h/mv$ , (2) considérer que les ondes associées aux gravitons dans se bouclent dans la cinquième dimension et les suivantes, de sorte à ce que la circonférence en contienne un nombre entier ( $2\pi R = n\lambda$ ).  $n = 1$  correspond à une particule de masse  $m$ ,  $n = 2$ , à une particule de masse  $2m$ , etc...La population entière de particules de masses étagées s'appelle une tour de Kaluza-Klein.

### *Extradimensions*

Ainsi, la réponse à la grande énigme de la gravité, déconcertante de simplicité, est de dire que la gravitation est faible parce qu'elle se perd dans des dimensions supplémentaires alors que la force électromagnétique (les électrons, les quarks, et les photons qui les relient) sont confinés, prisonniers de l'espace à 3 d, l'espace des petits oiseaux. Cette idée est fort séduisante, mais il faut la vérifier. Peut-on concevoir une expérience directe ou indirecte qui permettrait de la tester ? La réponse est positive :

(1) la mesure de la variation d'intensité de l'interaction gravitationnelle entre deux masses en fonction de la distance de celles-ci est, en théorie, apte à révéler l'existence de dimensions spatiales au delà de 3. Concrètement l'expérience est difficile et n'a pas pu être réalisée au dessous de 0.1 mm, ce qui est largement supérieur à la taille de l'atome ( $10^{-8}$  cm). Donc aucune expérience directe n'exclut l'existence d'une déviation par rapport à la loi en  $1/r^2$  au dessous de un dixième de mm. (les effets électromagnétiques, tel l'effet Casimir deviennent rédhibitoires). Comment mettre en évidence ces « nouvelles particules » et avec elles, de manière indirecte, les dimensions quinte, sixte... de l'espace? Deux méthodes s'offrent à nous : la première met en jeu les

grands accélérateurs de particules, en espérant que l'énergie qu'ils atteignent soit suffisante pour produire des excitations de Kaluza-Klein au LHC (quelques TeV). Cette méthode est certes la plus sûre, mais il est à craindre que l'énergie du faisceau soit insuffisante pour susciter l'apparition des extraparticules. La seconde a recours aux événements les plus chauds (explosifs) de l'astrophysique des hautes énergies, big-bang et supernovae.

### *Cartographie gamma*

Les photons gamma sont émis par les processus les plus violents de l'univers, émargeant au registre de la physique des hautes énergies (physiques nucléaire et des particules). Les processus répertoriés impliquent, (1) s'agissant de l'émission de photons gamma mono énergétiques (raies gamma) : la radioactivité, l'excitation nucléaire et l'annihilation des positons et (2) la formation de  $\pi^0$  via l'interaction proton-proton, le rayonnement de freinage des électrons (bremsstrahlung), et la cession d'énergie aux photons par les électrons de haute énergie (diffusion Compton inverse), s'agissant du spectre continu.

Des cartes de la galaxie ont été dressées par divers satellites gamma dans diverses gammes d'énergie (COSB, EGRET, OSSE) ainsi que des cartes tracées au moyen d'autres phénomènes (rayonnement infrarouge des poussières, rayonnement synchrotron des électrons rapides qui spiralent dans les champs magnétiques).

Il est édifiant de comparer les cartes de la galaxie tracée par les photons de haute énergie ( $> 100$  MeV), ceux de 1809 keV émanant de la désintégration de l'aluminium-26 et enfin ceux de 511 keV, successifs à l'annihilation des positons (avec ou sans formation de positronium). Nous en déduisons que l'aluminium radioactif provient des étoiles massives, et que par conséquent le disque galactique devrait briller de tous ses feux. Pourtant une source plus intense de photons de 511 keV apparaît nettement sur la carte tracée par INTEGRAL. Témoigne-t-elle de récentes explosions de supernova au centre de la Galaxie ou de tout autre chose ? C'est à la résolution de l'énigme des antiélectrons que nous allons nous atteler.

L'astronomie gamma nous offre un moyen de soumettre la splendeur théorique au feu de l'observation, ou du moins de limiter les ambitions des purs théoriciens. Les extradimensions existent-elles et dans quelles mesures ? Le CERN deviendra-t-il une usine à trous noirs ? Vous le saurez en assistant à ce cours.

Un indice, cependant: les gravitons (dénusés de masse) qui se propagent dans les dimensions supplémentaires avec une impulsion  $p$ , à la vitesse de la lumière apparaissent dans notre monde comme des particules de masse  $m = p$ . Ils sont instables et se désintègrent en photons ou paires électron-positons. Au cours de l'effondrement du cœur des étoiles massives, la température atteint de telles valeurs ( $\sim 30$  MeV) que des gravitons de Kaluza-Klein peuvent être engendrés en abondance. Si l'on n'y prend pas garde, l'émission de neutrinos peut s'éteindre rapidement, faisant des supernovae des pétards mouillés... mais à supposer qu'une étoile à neutron se forme dans de bonnes conditions, elle serait entourée d'un halo de gravitons massifs, se désintégrant lentement en deux rayons gamma ou une paire électron-positon... Les étoiles à neutrons seraient des sources de rayons gamma, et la galaxie entière, qui contient environ un milliard d'entre elles brillerait de manière très spéciale. L'univers entier en serait illuminé. (les meilleurs détectives pourront consulter Hannestad et Raffelt (hep-ph 0304029), s'agissant des gravitons de Kaluza-Klein ainsi que Matteucci (astro-ph 030634) s'ils veulent acquérir quelque lumière sur l'évolution de la galaxie dans laquelle s'inscrit la formation des étoiles à neutrons. Les conclusions générales de l'étude seront présentées de manière imminente dans un article signé Cassé, Paul et Bertone (2003).

### *Conclusion*

En mettant à nu la pointe extrême de la physique et aiguisé les tendances spéculatives les plus actuelles, nous avons tenté de réduire non seulement le hiatus entre échelle de Planck et échelle électrofaible, mais également le fossé qui se creuse entre enseignement, divulgation scientifique, d'une part et recherche, d'autre part. Il est bon de savoir ce qui se trame dans les institut de recherche les plus avancés.

Nous avons essayé de mettre en lumière le lien entre astronomie gamma, supernovae et étoiles à neutrons et la gravitation quantique placée sous l'égide des supercordes. Nous avons insisté sur la nécessité de brider la spéculation théorique et de la placer sous le contrôle de l'observation. Nous avons une nouvelle fois pris le ciel et les astres à témoin. A la question y a-t-il des dimensions supplémentaires le ciel répond peut être. Mais la crainte se fait jour que leur rayon (diamètre) soit limité au point de ne pas transparaître sous l'œil inquisiteur des physiciens de ce siècle.

### *Références*

- Schönfelder, 2002, Gamma ray astronomy, Springer  
J. Knödseder et al, 2003, astro-ph  
J.P. Uzan, 2003, astro-ph