



UPPSALA  
UNIVERSITET

1477



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

# Pourquoi poursuivons-nous de la recherche en physique des hautes énergies?

Tord Ekelöf  
Université d'Uppsala

# Pourquoi la haute énergie?

- Selon la mécanique quantique la haute énergie permet d'étudier de petites parties de matière - plus l'énergie est élevée, plus on peut étudier de petits détails.
- Selon la théorie de la relativité on peut créer des particules de matière à partir de l'énergie - plus l'énergie est élevée, plus les particules peuvent être massives.
- Selon la théorie du champ quantique relativiste, le vide est rempli de différents champs élémentaires à partir desquelles les particules élémentaires, jusque là inconnues, peuvent se matérialiser, à condition que nous puissions atteindre une densité d'énergie suffisamment élevée.

# Combien sont petits les détails qui ont pu être étudiés?

- L'accélérateur le plus énergétique du monde jusqu'à 2011, le Tevatron à Fermilab aux États-Unis, a été fermé l'année dernière. Dans le Tevatron, des faisceaux de protons et d'anti-protons étaient accélérés dans des sens opposés à une énergie équivalente à environ 1000 fois la masse du proton, après quoi on faisait collisionner les faisceaux.

- Le proton et l'antiproton contiennent chacun 3 quarks. L'énergie qui est échangé quand deux de ces quarks, un dans chaque faisceau, entrent en collision est suffisante pour étudier les structures élémentaires jusqu'à un millième de la taille d'un proton = un milliardième d'un milliardième d'un mètre = un nano-nano-mètre.

- Les expériences au Tevatron n'ont pas pu révéler une extension ou une structure interne des particules élémentaires. Si les particules élémentaires ont une extension, celle-ci doit donc être inférieure à un nano-nano-mètre.

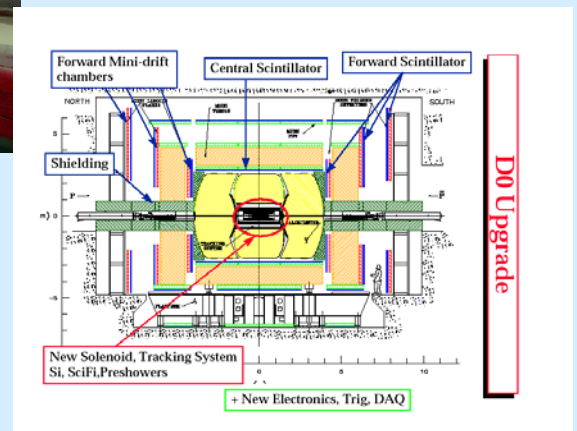
# Combien sont lourdes les particules qui ont pu être étudiées?

Lorsque deux quarks se sont heurtés d'une manière frontale dans le Tevatron, l'énergie cinétique échangée entre les quarks était parfois concentrée dans un volume d'une taille d'un nano-nano-mètre.

La densité d'énergie obtenue était dans ce cas (rares) suffisante pour matérialiser, à partir des champs élémentaires du vide, des particules élémentaires dont la masse était égale à la masse de plusieurs centaines de protons - au Tevatron il a été possible d'étudier plusieurs milliers de ces collisions.

De cette façon a été découvert en 1995 la plus lourde particule élémentaire connue jusqu'à présent, le quark *top*, qui a une masse égale à 190 fois la masse du proton, ce qui est égal à la masse d'un noyau d'un atome d'or.

# Le Tevatron à Fermilab, Chicago



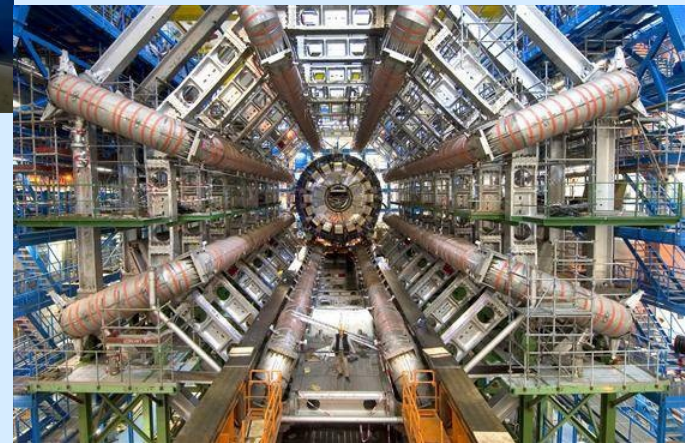
# Le grand collisionneur de hadrons LHC au CERN

Dans le LHC, qui a démarré au CERN en 2010, des protons sont accélérés à une énergie qui à l'heure actuelle est égale à d'environ 4000 fois la masse du proton et dans quelques années, 7000 fois la masse du proton.

Au LHC la taille et structure interne (s'il y en a) des particules élémentaires peuvent donc être étudiées à environ un dixième de nano-nano-mètres près.

Avec le LHC il sera possible de découvrir de nouvelles particules élémentaires encore plus massives (s'il y en a) avec des masses correspondantes à des masses de plusieurs milliers de protons.

# Large Hadron Collider LHC au CERN à Genève















# Que savons-nous des particules élémentaires aujourd'hui?

## Le Modèle Standard

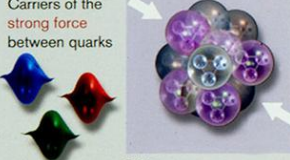

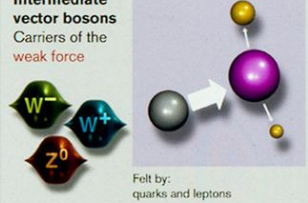
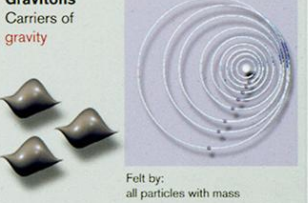
**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS				
<b>FIRST FAMILY</b>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	
<b>SECOND FAMILY</b>	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay	
<b>THIRD FAMILY</b>	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist	

QUARKS			
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one		<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two	
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974		<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964	
<b>Top</b> Heavier still		<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory	

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<b>Gluons</b> Carriers of the strong force between quarks  Felt by: quarks	<b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the electromagnetic force  Felt by: quarks and charged leptons
<b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the weak force  Felt by: quarks and leptons	<b>Gravitons</b> Carriers of gravity  Felt by: all particles with mass

The explosive release of nuclear energy is the result of the **strong force**

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of **electro-magnetic force**

Some forms of radio-activity are the result of the **weak force**

All the weight we experience is the result of the **gravitational force**

GRAPHICS: PETER CROWTHER



# Le Boson Higgs reste à découvrir

La théorie quantique des champs dans sa forme originale (Yang-Mills) exige que les particules de force soient sans masse - comme le photon l'est.

On a trouvé expérimentalement que les particules de la force faible ( $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ ) avaient la propriété d'être très massives (de l'ordre de 100 fois la masse du proton).

Il était donc nécessaire de trouver dans la théorie un moyen d'attribuer de la masse aux particules de la force faible - mais pas à la particule de force électromagnétique (photon). Cela a été accompli par l'introduction du champ de Higgs.

Avec le LHC le voyage de découverte continue vers l'inconnu ...

**Higgs**  
the mystery of mass

What causes particles to have mass? Why do the masses of fundamental particles differ so enormously - the top quark is more than 200,000 times heavier than the electron?

A solution has been developed by several physicists and takes the name of Peter Higgs. According to this, the whole of space is permeated by a field, similar in some ways to the electromagnetic field. As particles move through space they travel through this field. The interaction between the particles and the field is similar to the action of a viscous force felt by a particle moving through a thick liquid. The stronger the interaction of the particles with the Higgs field, the more mass they appear to have.

We know from quantum theory that fields have particles associated with them, so if the Higgs idea is right, there must be a Higgs particle. Finding it is the key to verifying whether our best hypothesis for the origin of mass is indeed correct.

$m_f = m_e \frac{G M}{r^2}$

Maxwell's mass and weight

$E = m c^2$

Einstein discovered that mass is equivalent to energy

The Higgs mechanism would explain the origin of mass

A simulation of the production of a Higgs particle decaying into two photons

A simulation of the Higgs signal for a decay into two photons (1 year of data taking at the LHC)

Events/500 MeV for 100 fb<sup>-1</sup>

$H \rightarrow \gamma\gamma$

Higgs signal

$M_{\gamma\gamma}$  (GeV)

Events / 2 GeV

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

A simulation of the Higgs signal for a decay into four leptons (1 year of data taking at the LHC)

$M_{4\ell}$  (GeV)

# Questions auxquelles le Modèle Standard n'a pas de réponse

- Pourquoi n'y a-t-il dans l'univers que de la matière et pas d'antimatière?
- Comment pouvons-nous unifier la force électrofaible et la force forte?
- De quoi est faite la matière noire?
- Nos descriptions des forces électrofaible et forte sont basées sur la conception des champs quantifiés dans le vide et notre description de la gravitation sur la base de la conception de l'espace-temps courbe - comment pouvons-nous trouver une description commune pour toutes les forces de la nature avec ces différents points de départ?

# Hypothèses: supersymétrie et cordelettes

La motivation de la quête pour trouver une théorie plus générale qui pourra remplacer le Modèle Standard est la le désir d'inclure la gravité dans la théorie afin d'obtenir un TOE - « Theory of everything ».

Dans cette optique, il est postulé

- qu' il y a une symétrie entre les particules de force et ceux de la matière, nommée la supersymétrie,
- qu' il y a plus de dimensions d'espace (jusqu'à 10) que les 3 que nous connaissons et
- que les plus petites unités de la matière ne sont pas des particules sans extension (des « points ») mais des cordelettes ou des membranes.

# Des bosons de Higgs chargés

Une des conséquences de l'hypothèse de la supersymétrie est qu'il y aurait non seulement des bosons de Higgs neutres, mais aussi des bosons de Higgs électriquement chargés.

Un thème principal à l'université d'Uppsala au CERN est de rechercher des bosons de Higgs chargés au LHC .



Séminaire au Collège de France le 27 juin à 17 heures

# Big Bang

L'enquête sur les plus petites particules et la poursuite d'une description globale de toutes les forces physiques sont directement liés à notre compréhension de la façon dont l'univers a été créé dans le Big Bang.

$10^{-43}$  s inflation

$10^{-34}$  s des quarks libres

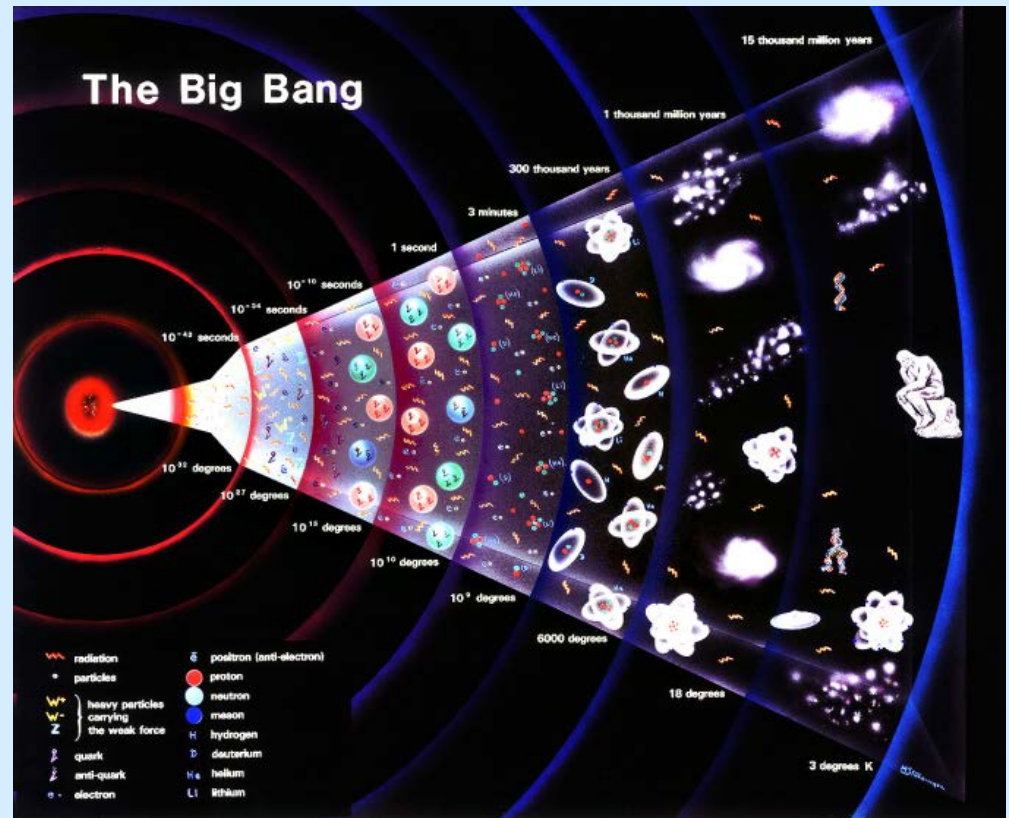
$10^{-10}$  s les hadrons sont formés

1 s - 3 min les noyaux d'hélium sont formés

$300 \cdot 10^3$  ans les atomes sont formés et la propagation de la lumière devient possible

$10^9$  ans la gravitation rassemble les atomes dans des nuages

$14 \cdot 10^9$  ans aujourd'hui



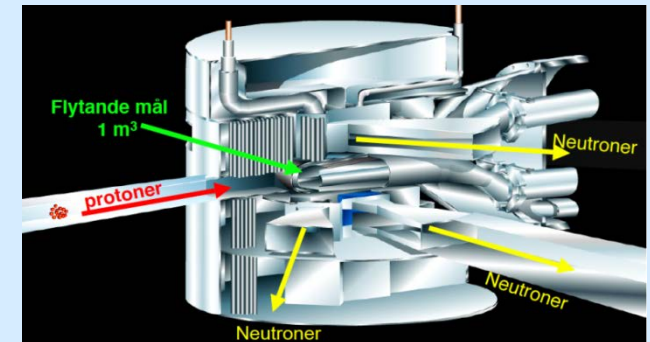
# Les applications immédiates de la physique des hautes énergies

Les technologies que nous développons pour l'expérimentation en physique des hautes énergies, jouent un rôle important pour:

- les autres sciences, telles que la recherche basée sur l'utilisation de la lumière de synchrotron (SOLEIL, SESAME) ou des neutrons de spallation (ILL, ESS) en science des matériaux et en biologie
- le diagnostic et traitement médical dans nos hôpitaux, par exemple caméras TEP et la thérapie de proton pour le cancer
- le contrôle de la qualité et des méthodes de fabrication dans l'industrie, par exemple détection de fissures dans les grandes structures mécaniques et la soudure par faisceau d'électrons.



SESAME EN JORDANIE

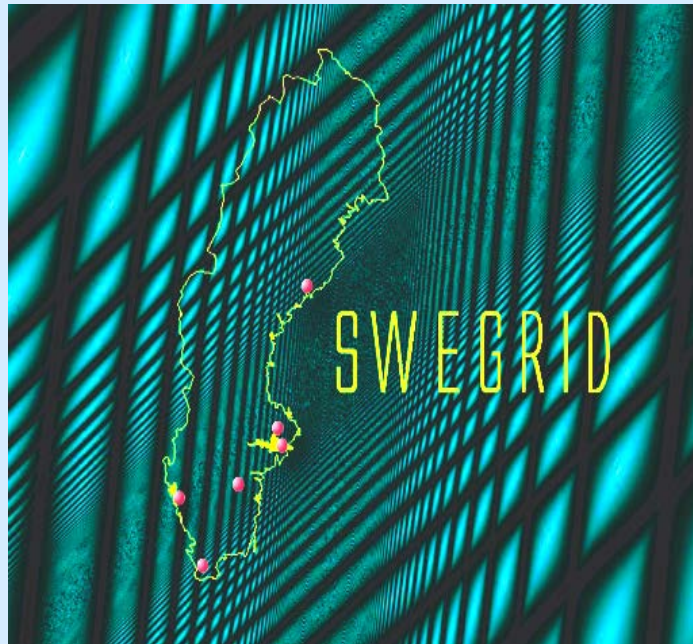


ESS A LUND



THERAPIE DE PROTON A UPPSALA

- et des applications dans la société au sens large, par exemple le World Wide Web et, plus récemment, les technologies de GRID et CLOUDS



# Pourquoi faisons-nous cela?

La réponse classique est: par curiosité.

La recherche fondamentale est souvent caractérisée comme une «recherche par curiosité».

Mais aucune recherche ne peut se faire sans la curiosité. La curiosité est une condition préalable à toute recherche, à la fois la recherche fondamentale et appliquée.

Ainsi, on ne peut pas caractériser la recherche de la physique des hautes énergies, par rapport à la recherche appliquée, en l'appelant «recherche par curiosité» à moins qu'on veuille prétendre qu'elle est exécutée avec ce seul motif, objet et but de satisfaire la curiosité.



# Quel est en réalité le motif, objet et but de la physique des hautes énergies?

Compte tenu des vastes ressources humaines, matérielles et financières investies dans la physique des hautes énergies il n'est pas raisonnable de penser que le seul motif, but et objectif de l'opération serait de satisfaire la curiosité de ses chercheurs.

La question devient alors:

Quel est en réalité le motif, objet et but de la physique des hautes énergies?

# A la frontière vers l'inconnu

La physique expérimentale des hautes énergies cherche à découvrir de nouveaux phénomènes physiques qui peuvent conduire à une compréhension d'une origine commune de la force électrofaible et forte et, ultérieurement, aussi de la gravitation.

La recherche est effectuée dans le microcosme à la frontière vers l'inconnu. Elle a de conséquences, par la théorie actuelle Big Bang de l'univers, aussi pour notre compréhension du macrocosme.

Un telle frontière vers l'inconnu a existé dans la recherche en physique moderne empirique depuis ses débuts.

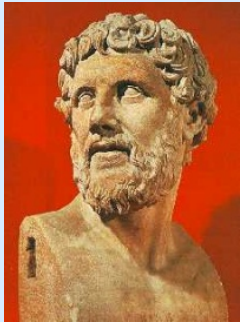
# Avant Copernic, Galilée et Kepler

Avant la physique moderne empirique, on considérait que les sources de la connaissance de la réalité physique étaient:

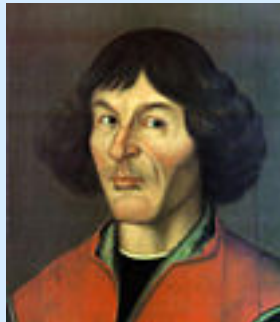
- La spéculation intuitive basée sur ce qu'on voyait autour de soi dans le monde, sans exigence d'expériences reproductibles ou de mesures quantitatives (les observations en astronomie constituant une exception importante menée par des précurseurs)
  - L'interprétation des textes qui faisaient autorité (en l'occident les écrits d'Aristote et la Bible)

Cette attitude a été battue en brèche dès la Renaissance par des précurseurs comme Copernic, Galilée, Kepler et d'autres

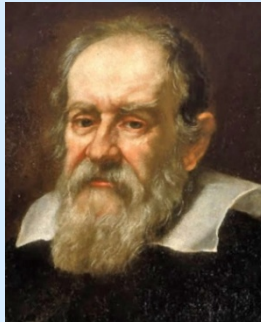
# L'avenir...



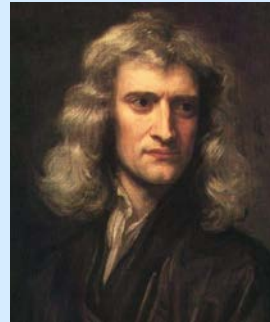
Demokritos



Kopernikus



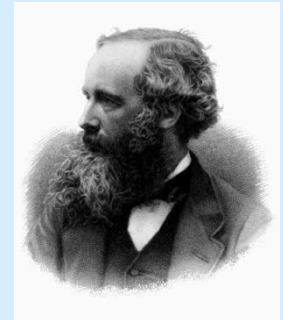
Galileo



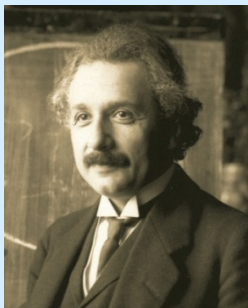
Newton



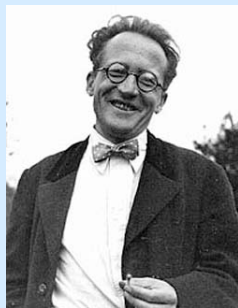
Dalton



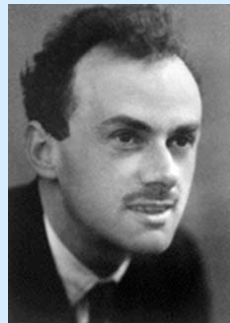
Maxwell



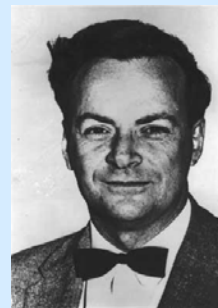
Einstein



Schrödinger



Dirac



Feynman



Salam



Nambu

# De nouveaux paradigmes

La physique des hautes énergies est donc, dans un sens, la poursuite du projet, jusqu'à présent très fructueux, d'élargir notre connaissance de la réalité physique dans les domaines du le microcosme où nous avons jusqu'ici été entièrement incapables de faire des mesures directes.

L'espoir véritable n'est pas de ainsi confirmer le Modèle Standard, mais d'être en mesure de démontrer qu'il a de failles. Le but est de trouver ses failles et les étudier en détail et, à partir de ces études, construire de nouveaux paradigmes et de nouvelles descriptions de la réalité physique.

La physique, comme nous l'avons vu, a subi depuis la Renaissance un certain nombre de changements de paradigmes.

# Newton, Le siècle des Lumières et la Révolution française

Ces transformations/révolutions des paradigmes de la physique ont exercé une forte influence, non seulement sur les conditions matérielles de notre société, mais aussi sur les conditions intellectuelles et culturelles.

Par exemple, la théorie de Newton a fait une forte impression sur tous ses contemporains. Entre autres, elle a renforcé l'idée que l'homme peut, avec sa raison, comprendre, prédire et contrôler ce qui va arriver dans la nature physique et, en conséquence, il doit aussi pouvoir façonner le monde où il vit.

Dans certains cas, cette foi en la capacité intellectuelle humaine a conduit à un excès de confiance en, par exemple, la possibilité de rapidement remodeler notre société en se fondant sur des raisons apparemment rationnelles. La Révolution française peut être considérée comme une expression de cette excès de confiance.

# La science et la société

- L'origine des espèces de la théorie évolutionniste de Darwin,
  - la relativité de la théorie de la gravitation d'Einstein,
  - le principe d'incertitude de la mécanique quantique et
  - le code de l'héritage génétique implanté dans l'ADN
- sont d'autres progrès scientifiques qui ont eu une influence profonde sur nos conceptions de la condition humaine et, donc, sur la vie sociale

De même, les découvertes futures des nouvelles symétries de la nature, des dimensions spatiales supplémentaires et une origine commune des forces de la nature vont pouvoir développer notre vision de la réalité et donc influencer notre société.

# Le développement technologique

En outre, le développement de toute la technologie moderne est, directement ou par l'intermédiaires de la recherche appliquée, enracinée dans les réalisations de la recherche scientifique fondamentale.

Le développement technologique est, comme tout développement intellectuel culturel, pour le meilleur et pour le pire.

Mais qui peut vraiment imaginer de revenir en arrière, ou même de retenir, ce développement?

L'histoire de la science naturelle nous montre l'importance de la participation à la recherche à la frontière vers le complètement inconnu. Elle enrichit notre culture. Elle nous donne également une meilleure possibilité de comprendre les résultats nouveaux de la recherche à un stade précoce et d'être en mesure de contribuer à ce que les nouvelles découvertes soient appliquées dans la vie de notre société d'une manière constructive.



# Pourquoi poursuivons-nous de la recherche en physique des hautes énergies?

**L'aventure** ... pour élargir et développer davantage nos connaissances sur le monde dans lequel nous vivons

**Les innovations** ... pour élaborer et appliquer de nouvelles technologies et innovations pour l'utilisation dans notre vie quotidienne à relativement courte terme (5-20 ans)

**L'avenir** ... pour jeter la base pour - et stimuler - le développement matériel et intellectuel de la culture humaine à long terme

# Il est beau et utile de jouir de la pomme de la connaissance

