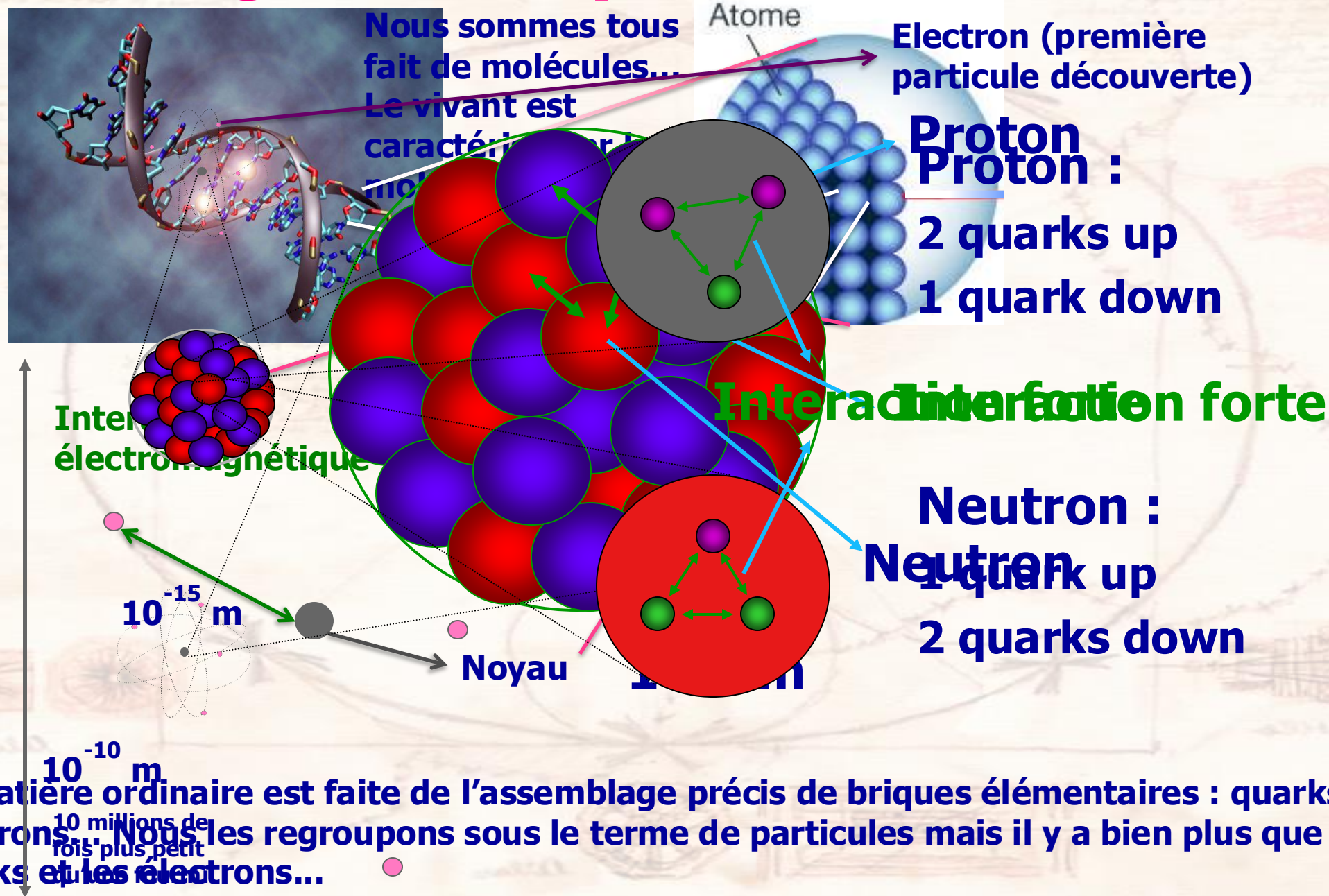


# La physique des particules et Atlas

**Stéphanie Beauceron (LPNHE)**

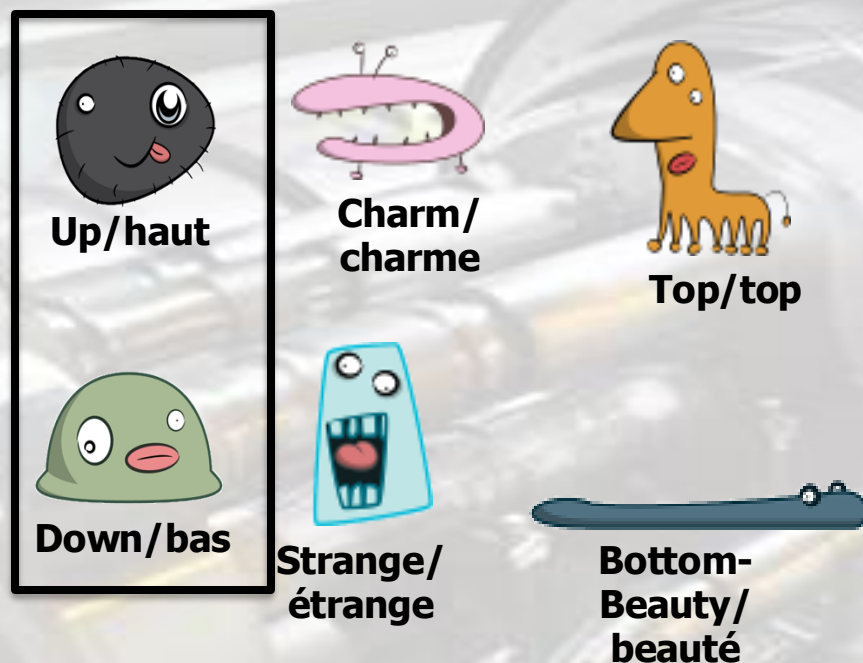
# Qu'est ce que la matière?



# Le Zoo des particules

Ces 2 Quarks et 1 Lepton (+neutrinos) constituent  
tout L'Univers connu

## Quarks



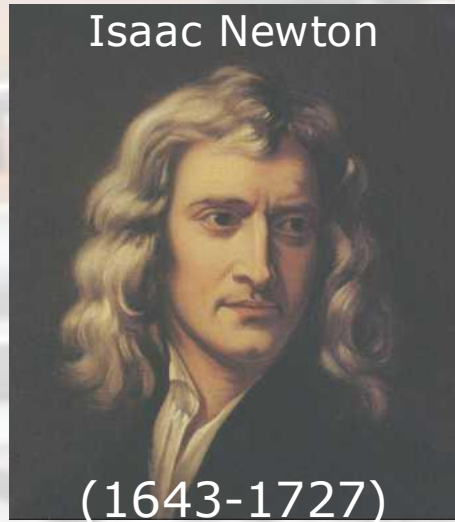
## Leptons



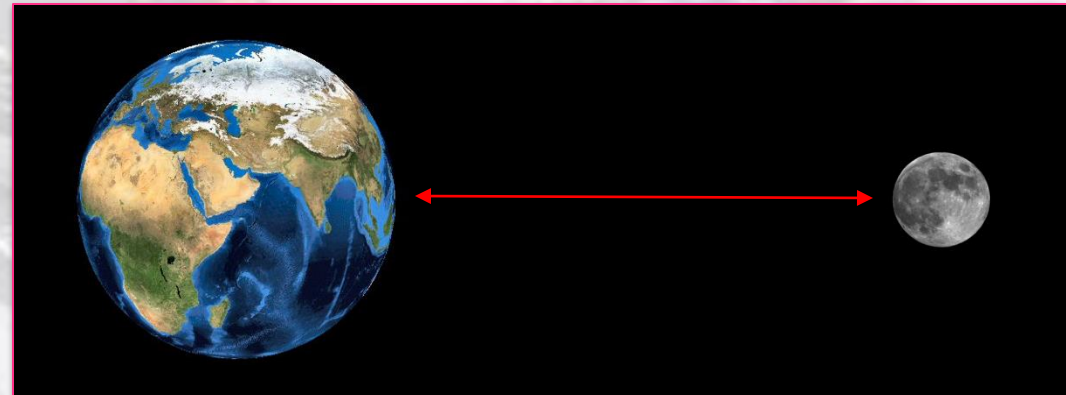
Les autres particules vont se désintégrer  
dans des particules « stables ».



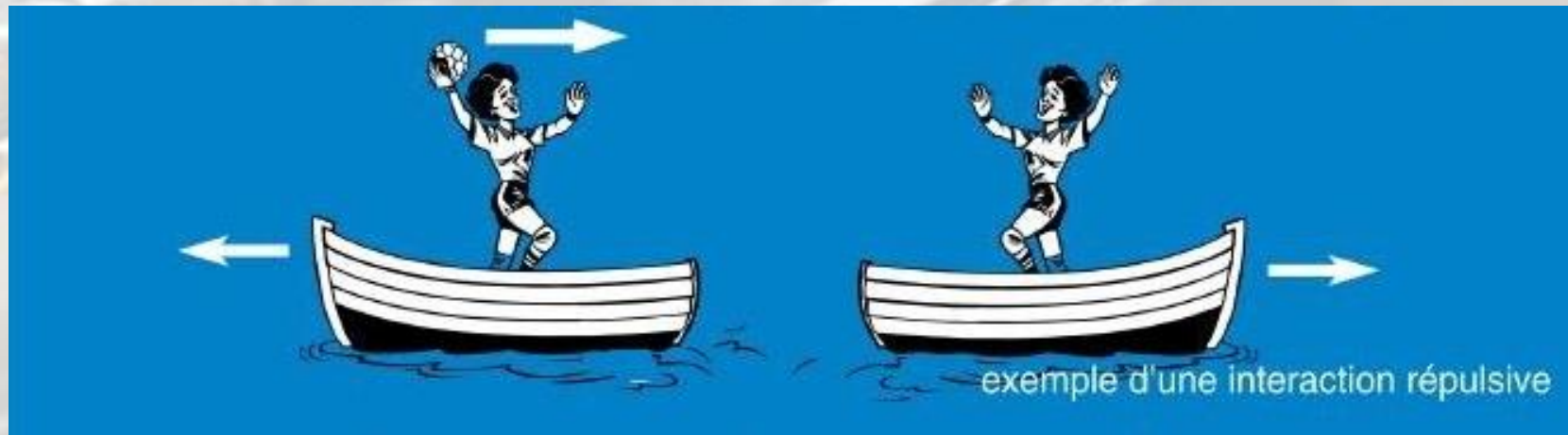
# Les forces/interactions



Vision « classique » :  
Action instantanée à distance

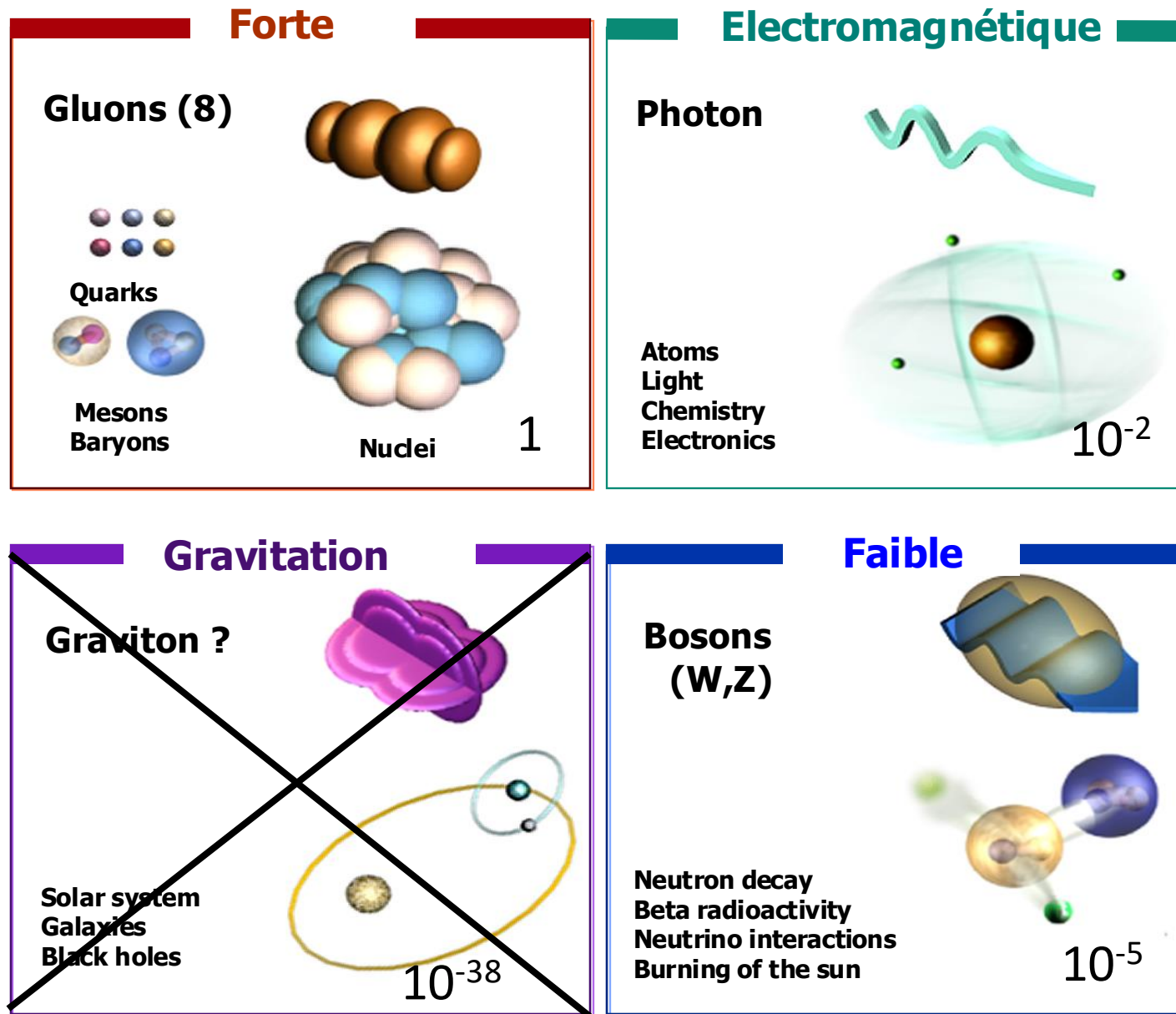


Vision « moderne » : échange de particules





# Les Forces



Intensité  
relative

# Le modèle standard

Depuis le début des années 70, les physiciens des particules ont synthétisé toutes leurs connaissances au sein d'un modèle unique : le « Modèle Standard »

On connaît et comprend beaucoup mais on ne sait pas tout...  
Des mystères restent inexplicables, des choses à découvrir...

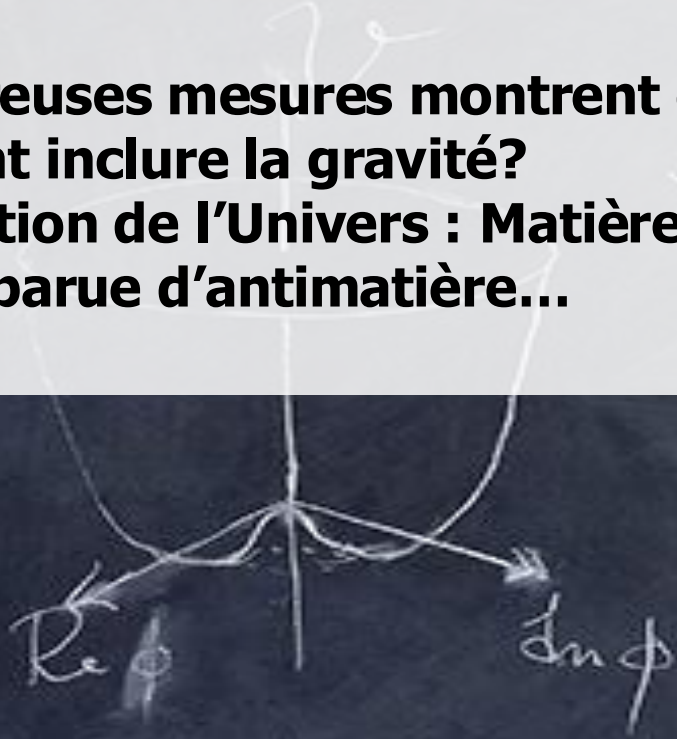




**Une théorie : Modèle standard de la physique des particules décrit les interactions de toutes ces particules.**

**De nombreuses mesures montrent que ce modèle marche bien, mais encore des questions :**

- Comment inclure la gravité?**
- composition de l'Univers : Matière noire, nouvelles particules pas encore observées**
- Où a disparue d'antimatière...**



$$D_\mu \phi = \partial_\mu \phi - ie A_\mu \phi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$V(\phi) = \lambda \phi^* \phi + \beta (\phi^* \phi)^2$$

$$\lambda < 0, \quad \beta \geq 0$$

Peter Higgs



# Qu'est-ce que l'antimatière?

Pour chaque type de particule

Il y a une antiparticule



up



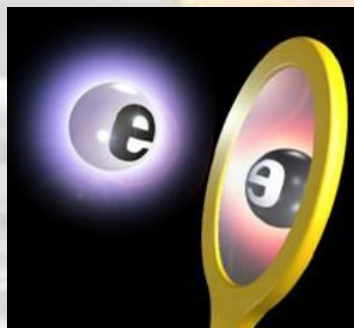
down



électron



électron  
neutrino



anti-up



anti-down

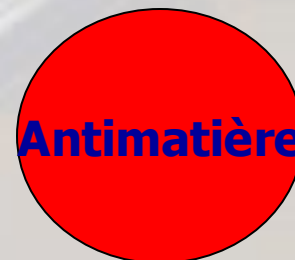


positron



Antiélectron  
neutrino

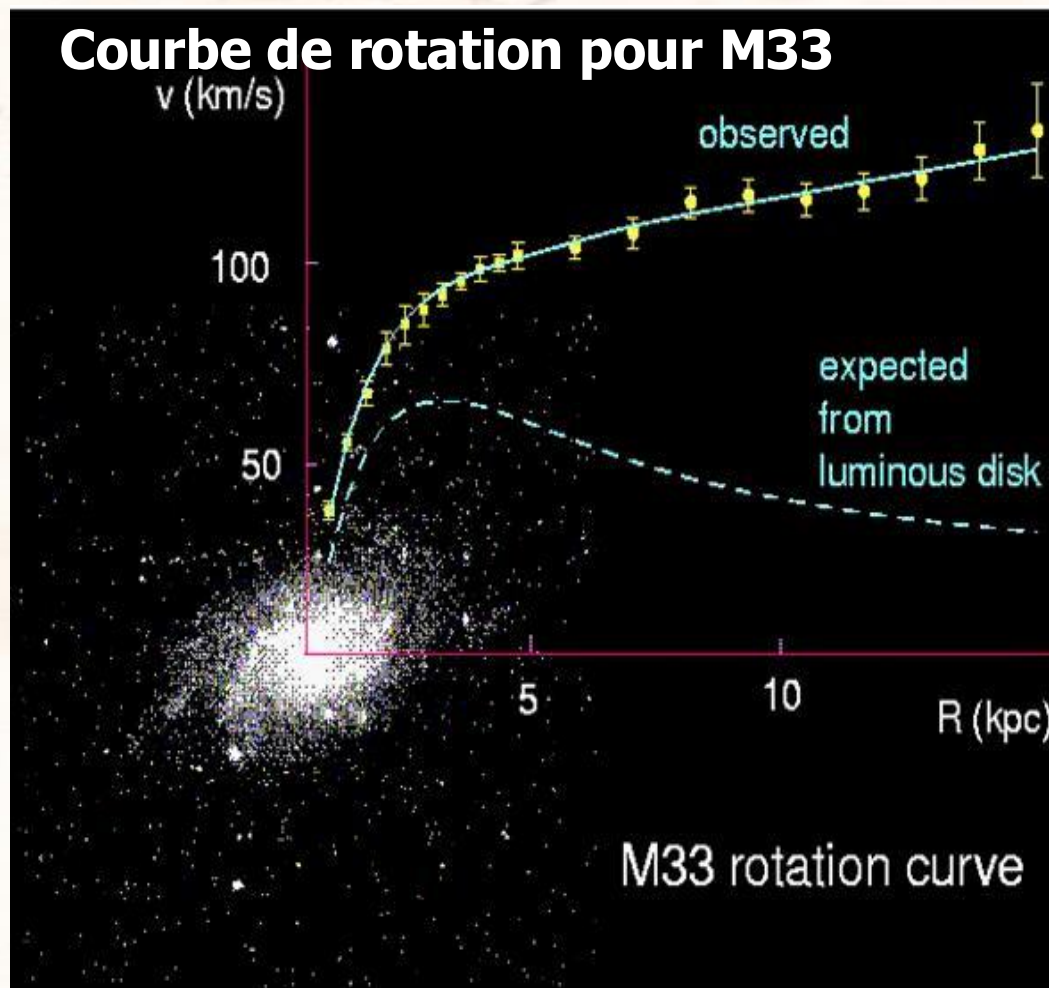
Les particules et les antiparticules ont  
des charges électriques de polarités opposées



Il y a 14 milliards d'années, le Big Bang a créé la matière et l'antimatière en quantités égales. Nous existons parce qu'il n'y a plus d'antimatière. Où est-elle donc passée? Pourquoi la nature préfère-t-elle la matière?

# Rotation des galaxies

indice de l'existence de la matière noire au niveau galactique (Vera Rubin ~1980 -1990)



L'étude de la rotation des galaxies spirales montre que la masse de la galaxie est :

$$M_{\text{total}} \sim 10 \times M_{\text{luminous matter}}$$

Explications possibles :

- Matière dite noire car non visible dans le halo galactique
- Présence d'objets compacts massifs (Machos = massive compact objects)...



# De quoi est fait notre Univers...

**Des effets sur des galaxies nous disent qu'il y a bien plus de matière/énergie que ce que l'on voit**

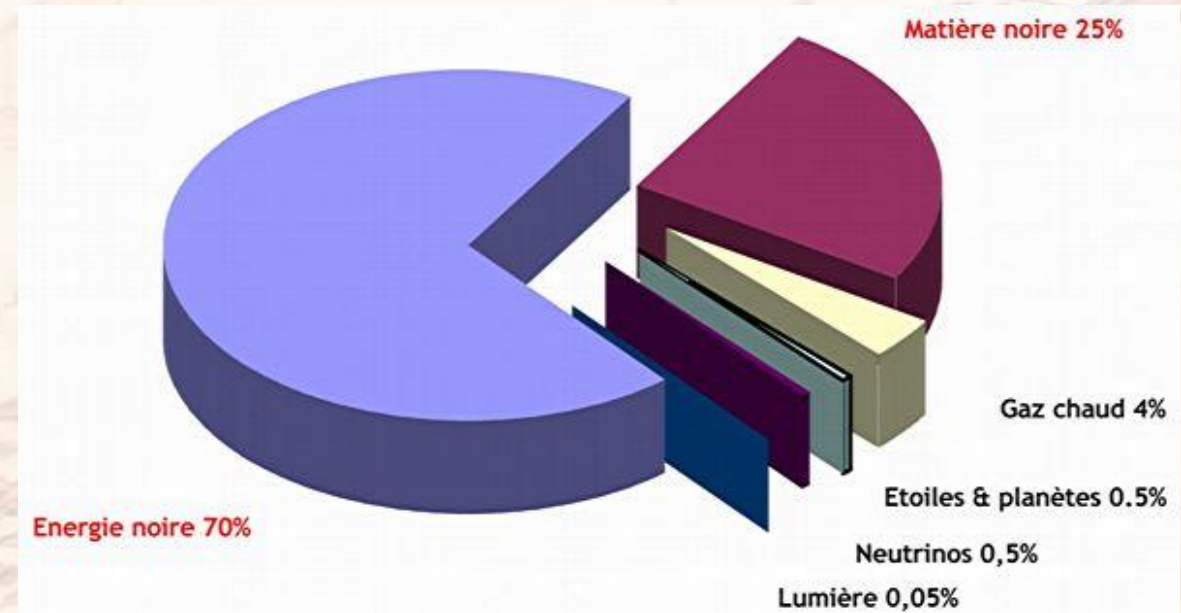
**→ "matière/énergie" noire**

**On ne voit que ~4% de la matière de l'Univers!**



**Cette « matière/énergie noire » pourrait être constituer de particules pas encore découvertes ?**

**Le LHC pourrait créer ces particules et les détecteurs sur l'anneau pourraient les détecter indirectement.**





# Des particules massives!



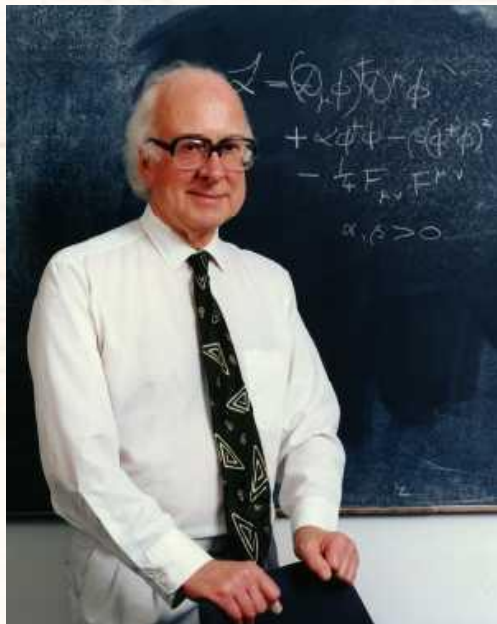
**quarks**

**leptons**

**Avant 2012, notre théorie nous dit que les particules sont « sans » masse, sauf que l'expérience nous dit l'inverse...**

**La raison est l'existence d'une nouvelle particule appelée "le Boson de Higgs"**

# Le boson de Higgs



Dans le modèle standard, l'origine des masses trouve sa place via un mécanisme appelé d'après le nom du physicien britannique : Peter Higgs (et Brout, Englert)

Ce mécanisme prédit l'existence d'une nouvelle particule : le boson de Higgs.



Le 4 juillet 2012, nous avons découvert une particule qui est le boson de Higgs : cette particule a une masse de  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

# Les outils

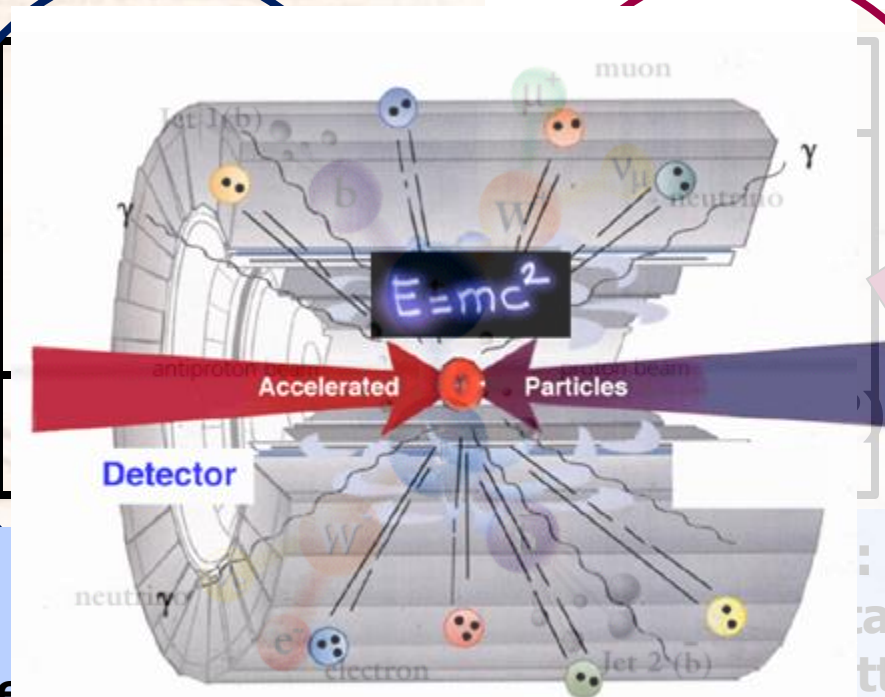
**Comment « voir » les particules élémentaires ?  
en “cassant” des particules lors de collisions  
en créant des particules à partir d'énergie pure**

**Les outils  
un accélérateur  
des détecteurs de particules**



La masse est juste  
une forme d'énergie

$$E=mc^2$$



**Accélérateur :  
Donner de l'énergie  
(vitesse aux particules)**

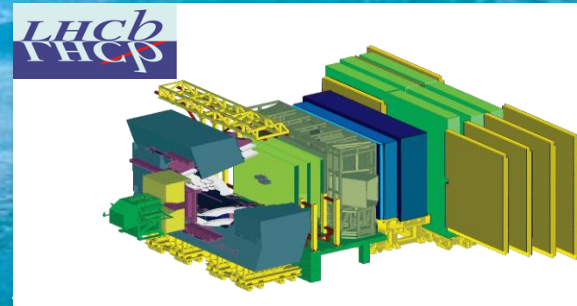
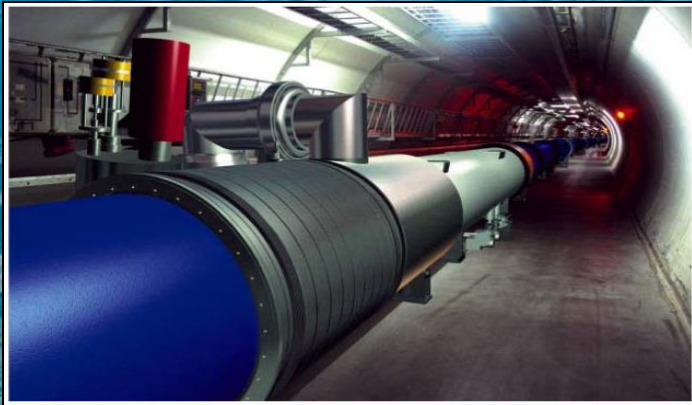
**État final et mettre en  
évidence la nouvelle particule**



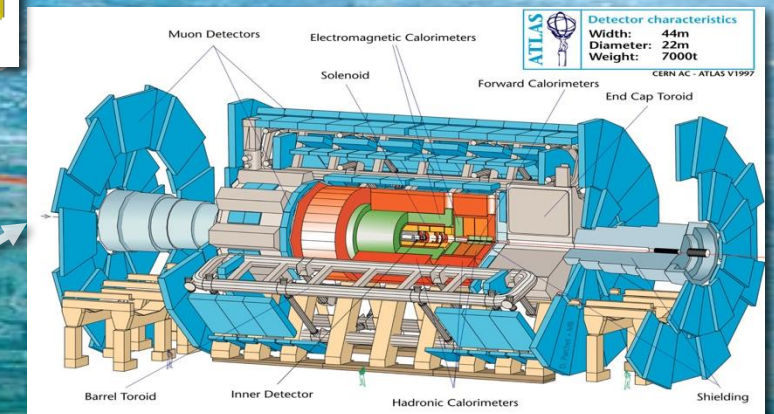
# Le LHC (Large Hadron Collider)

Le projet a démarré en 1989... Mais la conférence ECFA à Aix-la-Chapelle en Octobre 1990 est le vrai point de départ.

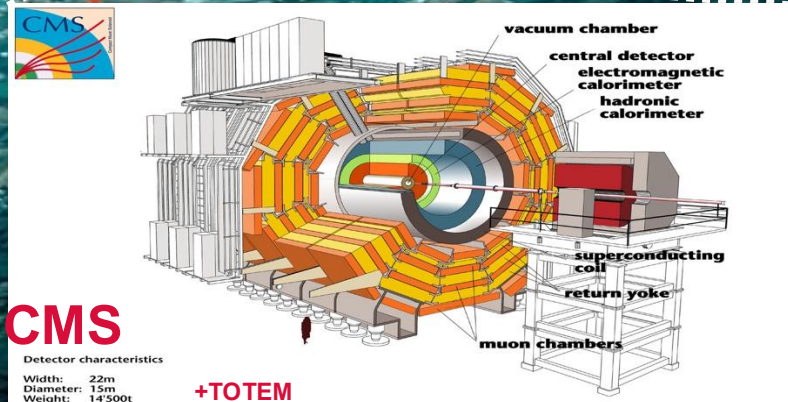
LHC : 28 km (7km en Suisse)  
100m sous terre



pp, physique du B  
Violation de CP



Exp. généralistes,  
pp, ions lourds



Ions lourds





# LHC : quelques chiffres

## Energie des collisions

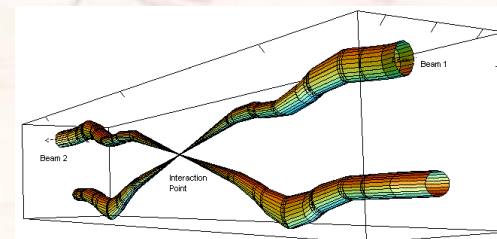
**Actuelle: 13,6 TeV (1 faisceau autant d'énergie qu'un TGV à 300 km/h)**

## La précision absolue

**paquets : quelques cm de long,  
taille transverse: 16  $\mu\text{m}$  x 50  $\mu\text{m}$**

**$\sim$  diamètre d'un cheveu**

**$\sim$ 2800 paquets de 100 milliards de protons, séparation entre paquet  $\sim$ 7 m**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

## La plus grande machine du monde

**Circonférence : 26659m**

**9300 aimants ( $\rightarrow$  maîtrise des matériaux supraconducteurs)**

## Le circuit le plus rapide de la planète

**Proton: c-40km/h**

**(99.9999991% de la vitesse de la lumière)**

**$\sim$ 40 millions collisions par secondes**

## L'espace le plus vide du système solaire

**Pression 10 fois plus faible que sur la lune**

## Le plus grand réfrigérateur

**Aimants sont refroidis à -271°C, plus froid que l'espace intersidéral**

**Coût (construction) : 3 milliards d'Euros pour l'accélérateur,**

**$\sim$ 400 millions d'Euros pour ATLAS et CMS**



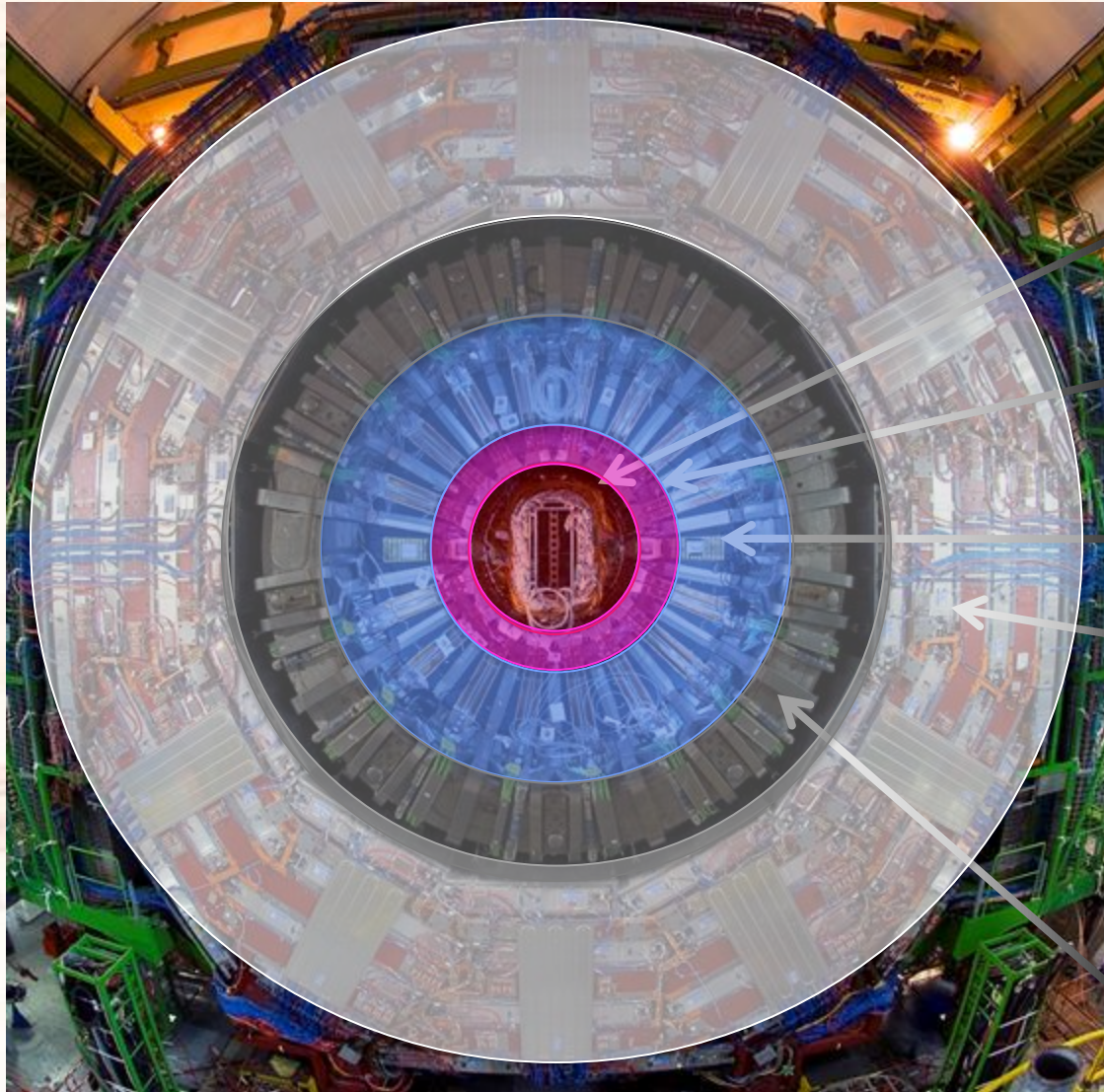
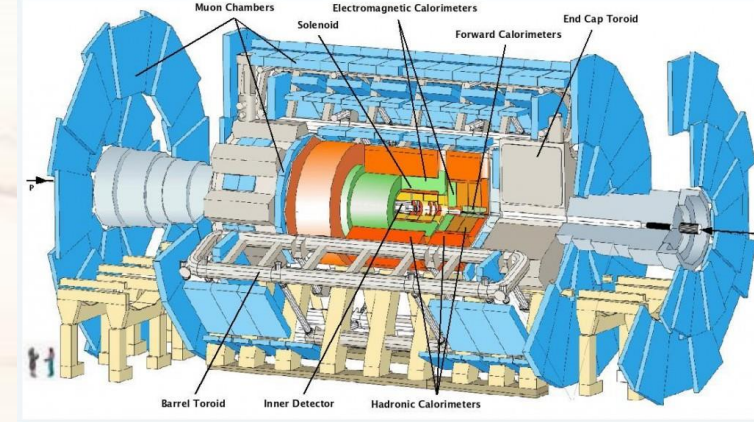


# Le pistage, ou comment savoir qu'une particule est passée par là...





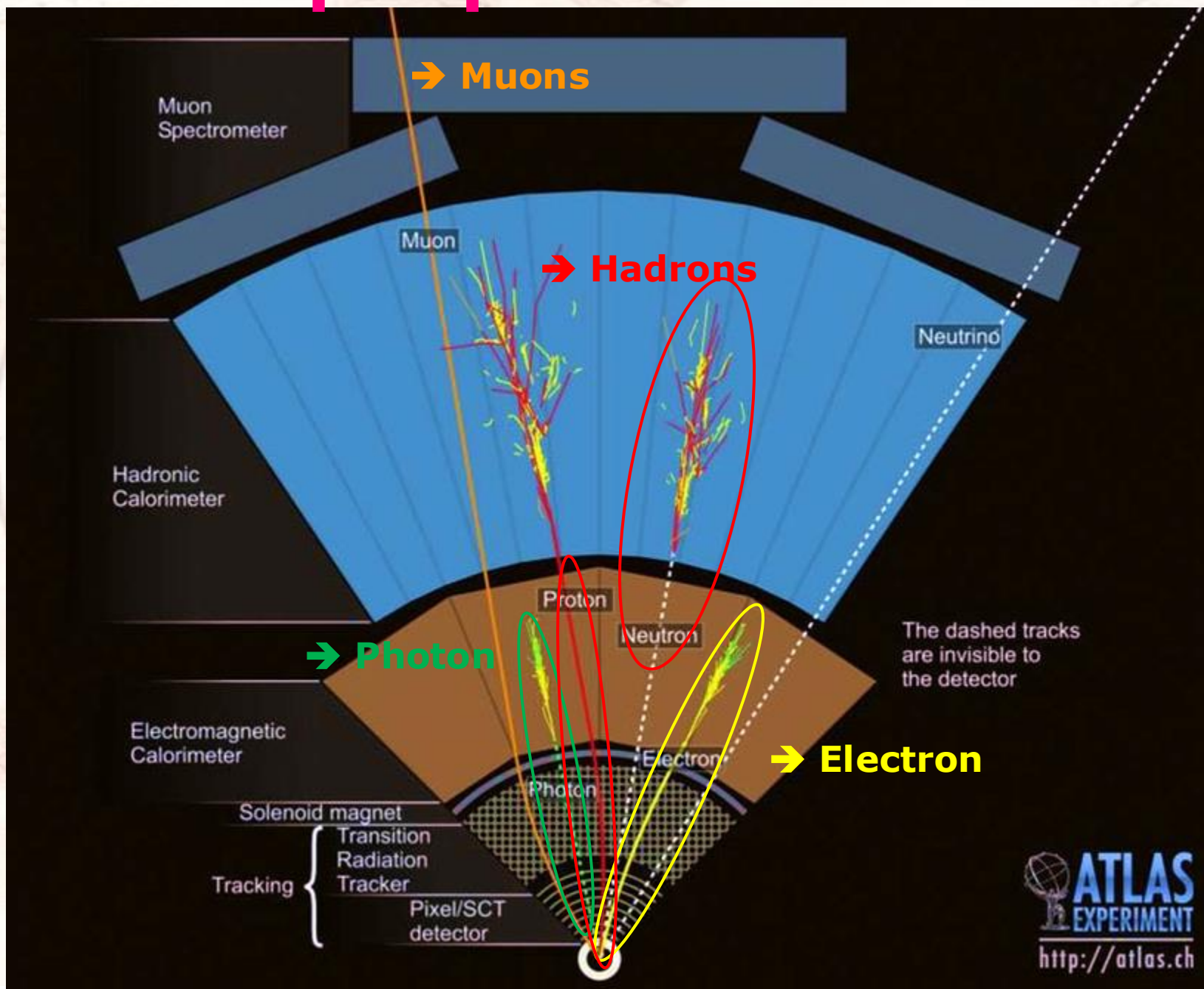
# Un détecteur "classique"



- **Trajectographe**
- **Calorimètre électromagnétique**
- **Calorimètre hadronique**
- **Chambres à muons**
- **Toutes les sous-parties sont plongées dans un champ magnétique**



# Un peu plus réellement...

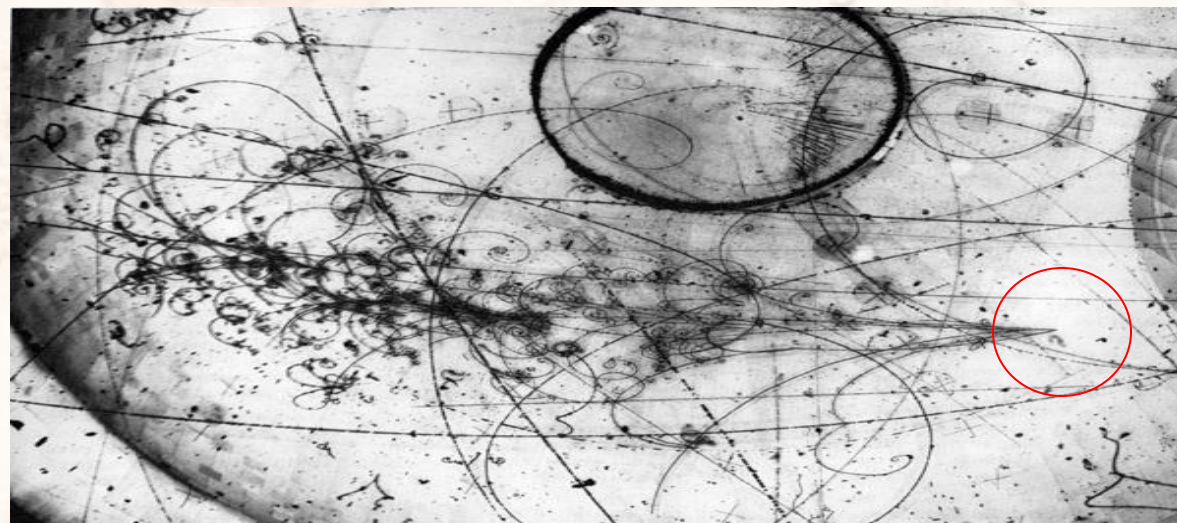


# Trajectographes :

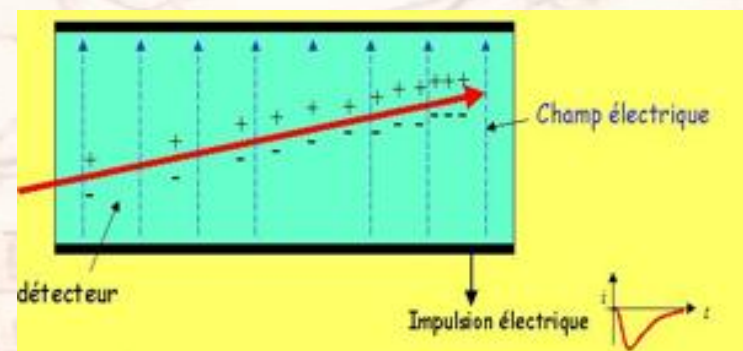
## détection toutes les particules chargées

En plongeant le détecteur dans un champ magnétique, la trajectoire de la particule est courbée information (impulsion, masse, charge)

Un outil merveilleux :  
les chambres à bulles



La méthode moderne :  
le détecteur électronique: Ionisation des  
atomes du milieu par des particules chargées  
Récupération des charges créées





# Des millions de collisions



25 ns bunch crossing  
25 ns entre les paquets





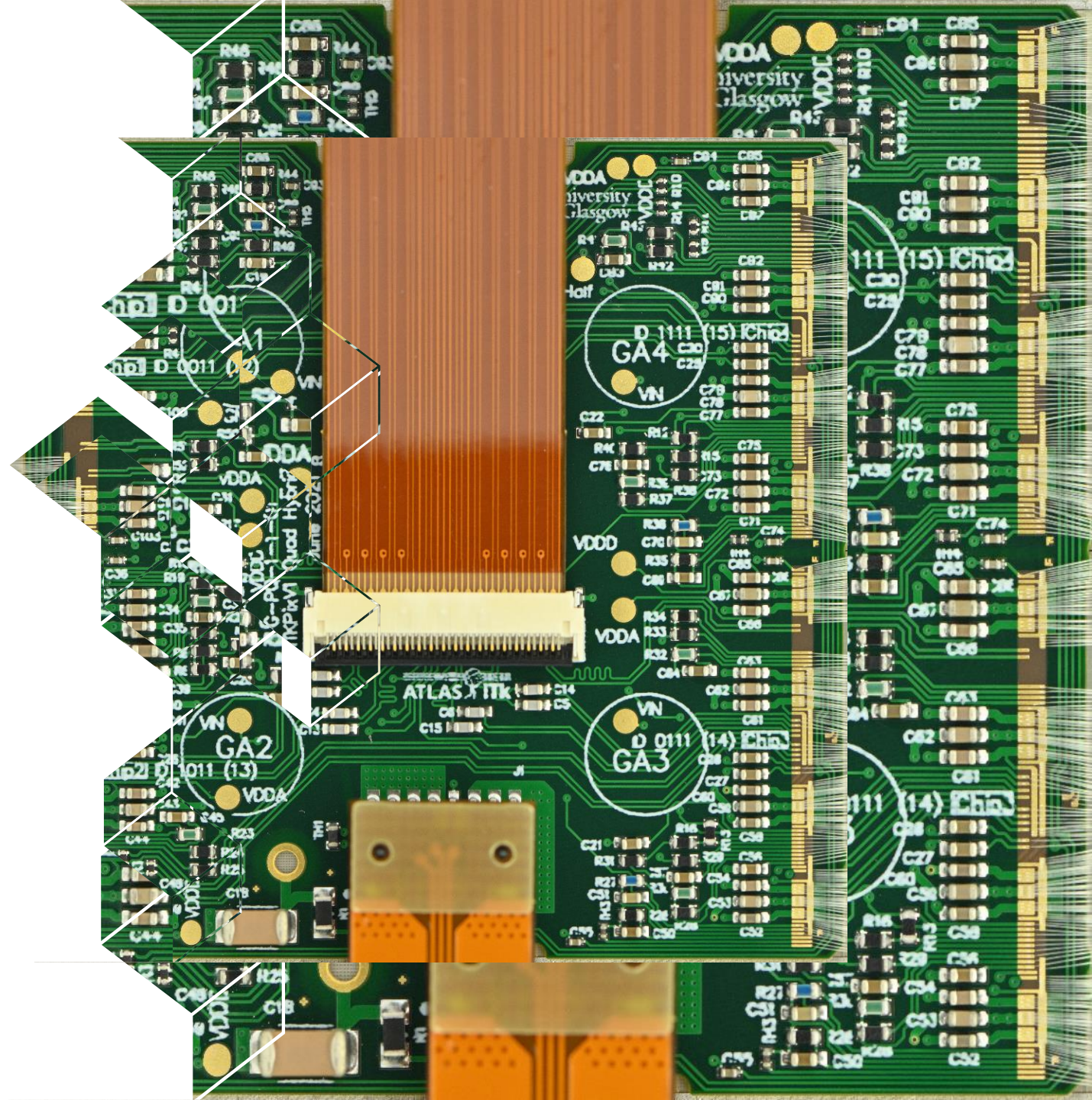
irfu



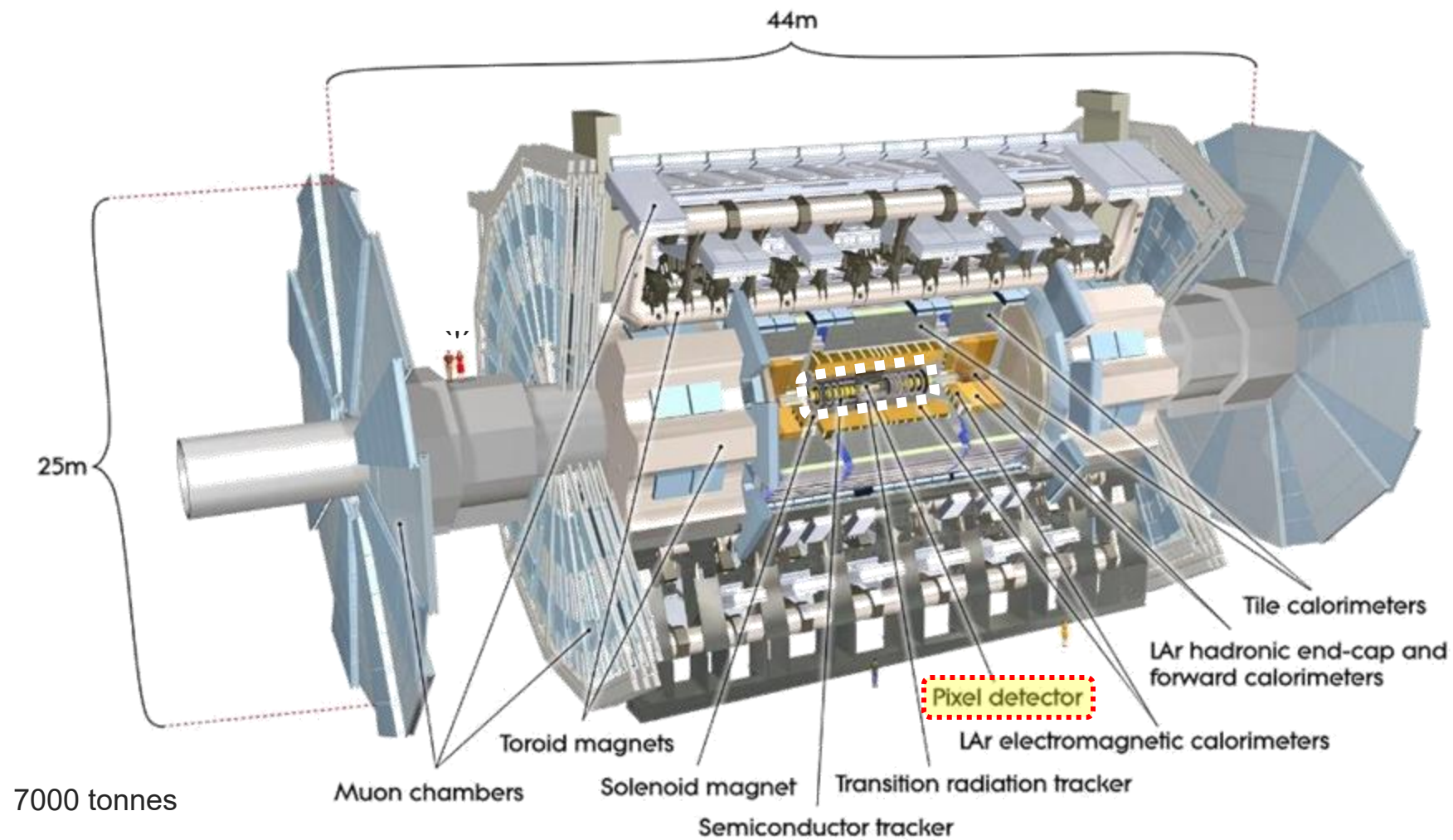
ITK

Paris Cluster workshop

2025-11-27

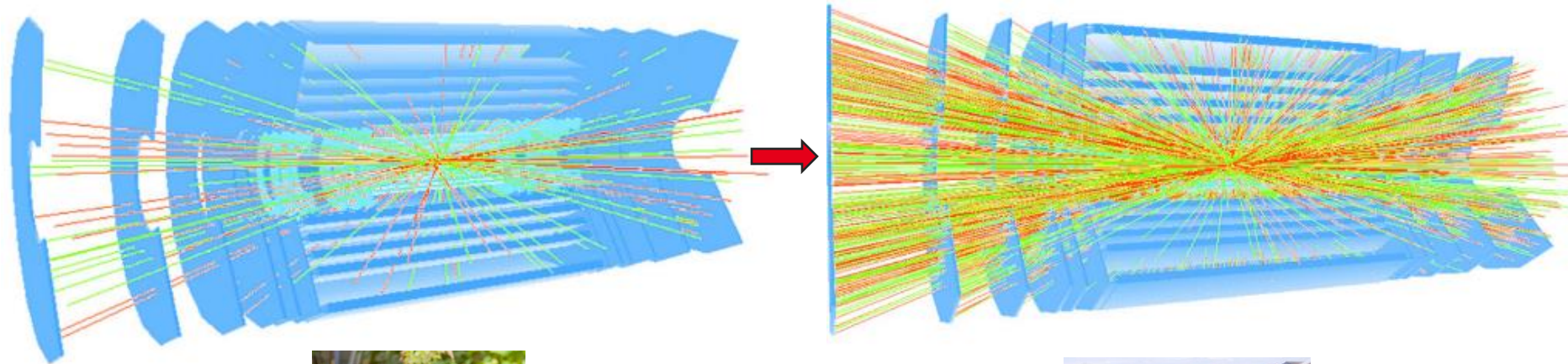






# Amélioration de l'accélérateur – Conséquences pour ATLAS

25 → 200 INTERACTIONS PAR CROISEMENT DE FAISCEAUX



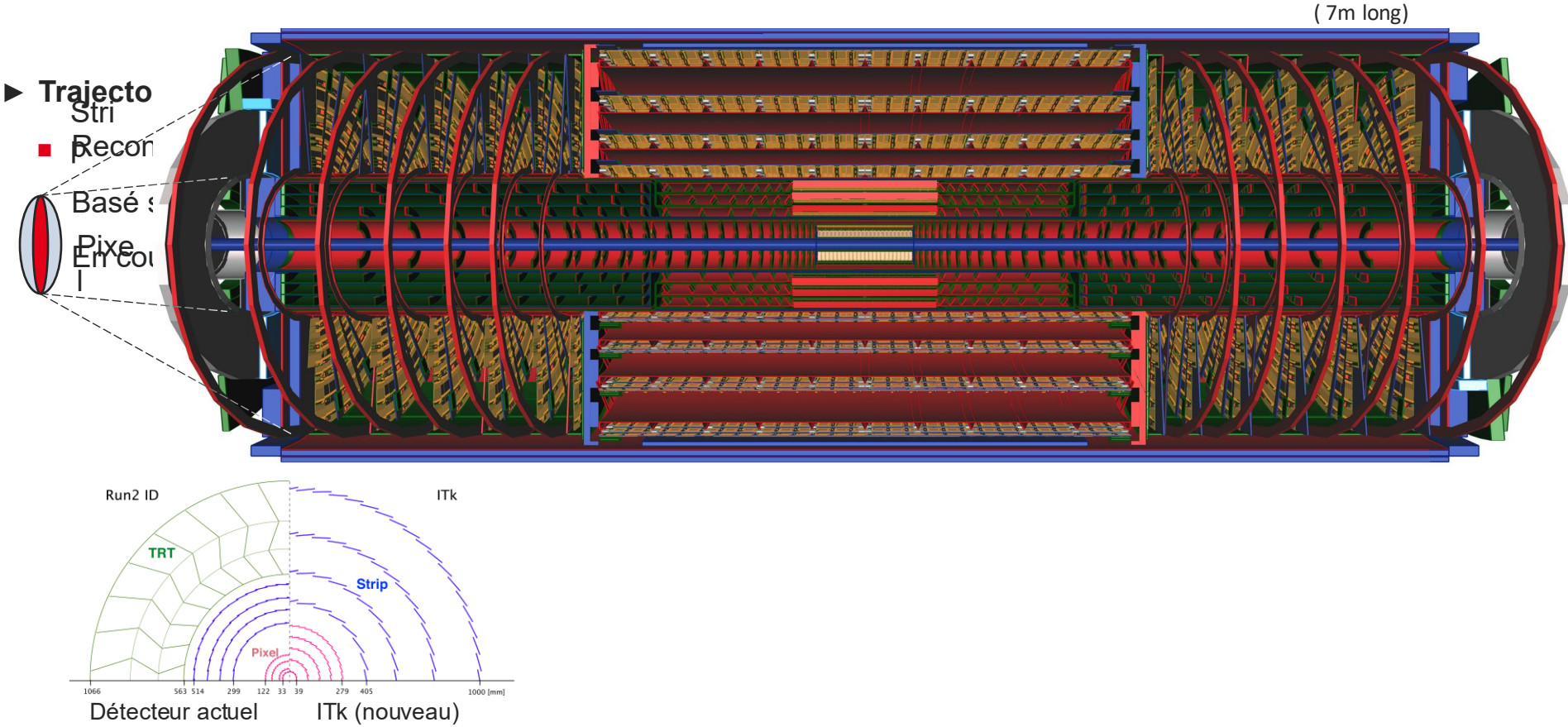
Remplacement nécessaire de certains détecteurs (qui autrement seraient 'aveugles' 90% du temps)





# ■ **ATLAS Inner Tracker (ITk)**

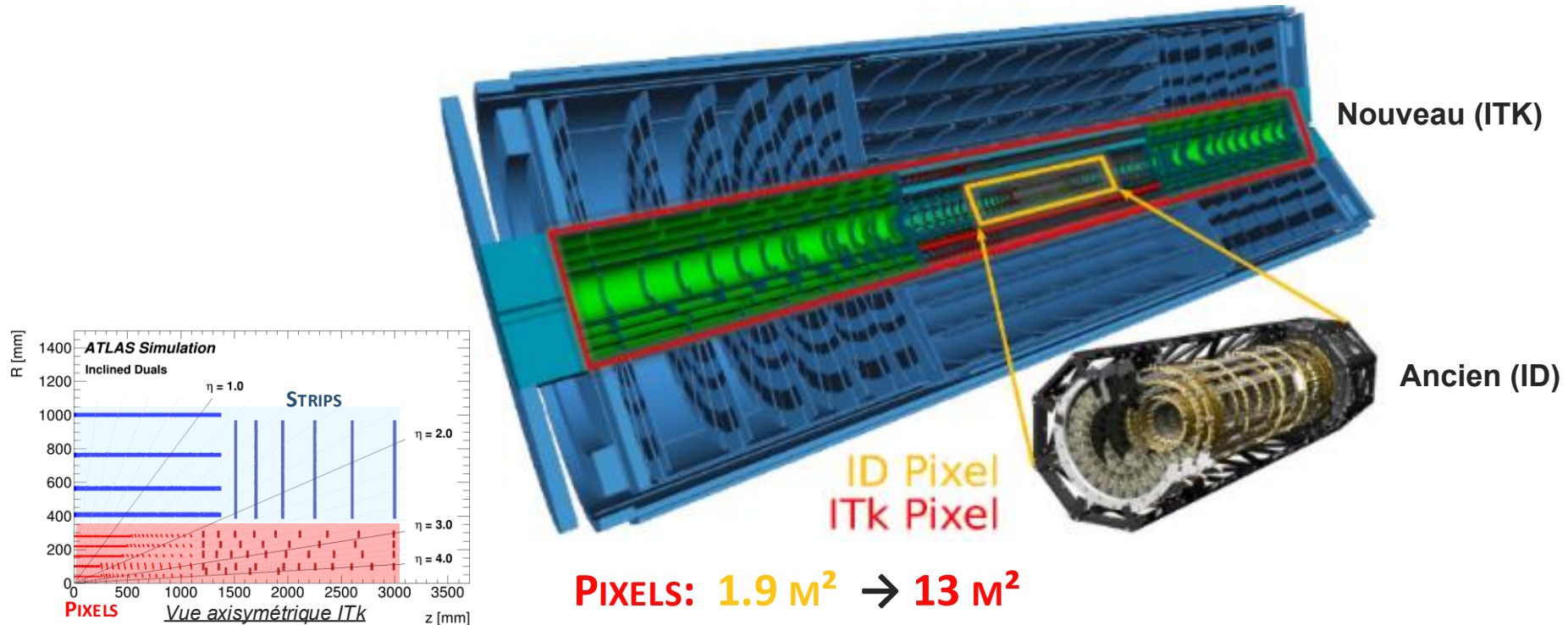
# ATLAS Inner Tracker (ITk)





# ATLAS ITk - Un sacré facteur d'échelle !!!

STRIPS:  $60 \text{ M}^2 \rightarrow 160 \text{ M}^2$  (50 MILLIONS DE VOIES)



PIXELS:  $1.9 \text{ M}^2 \rightarrow 13 \text{ M}^2$

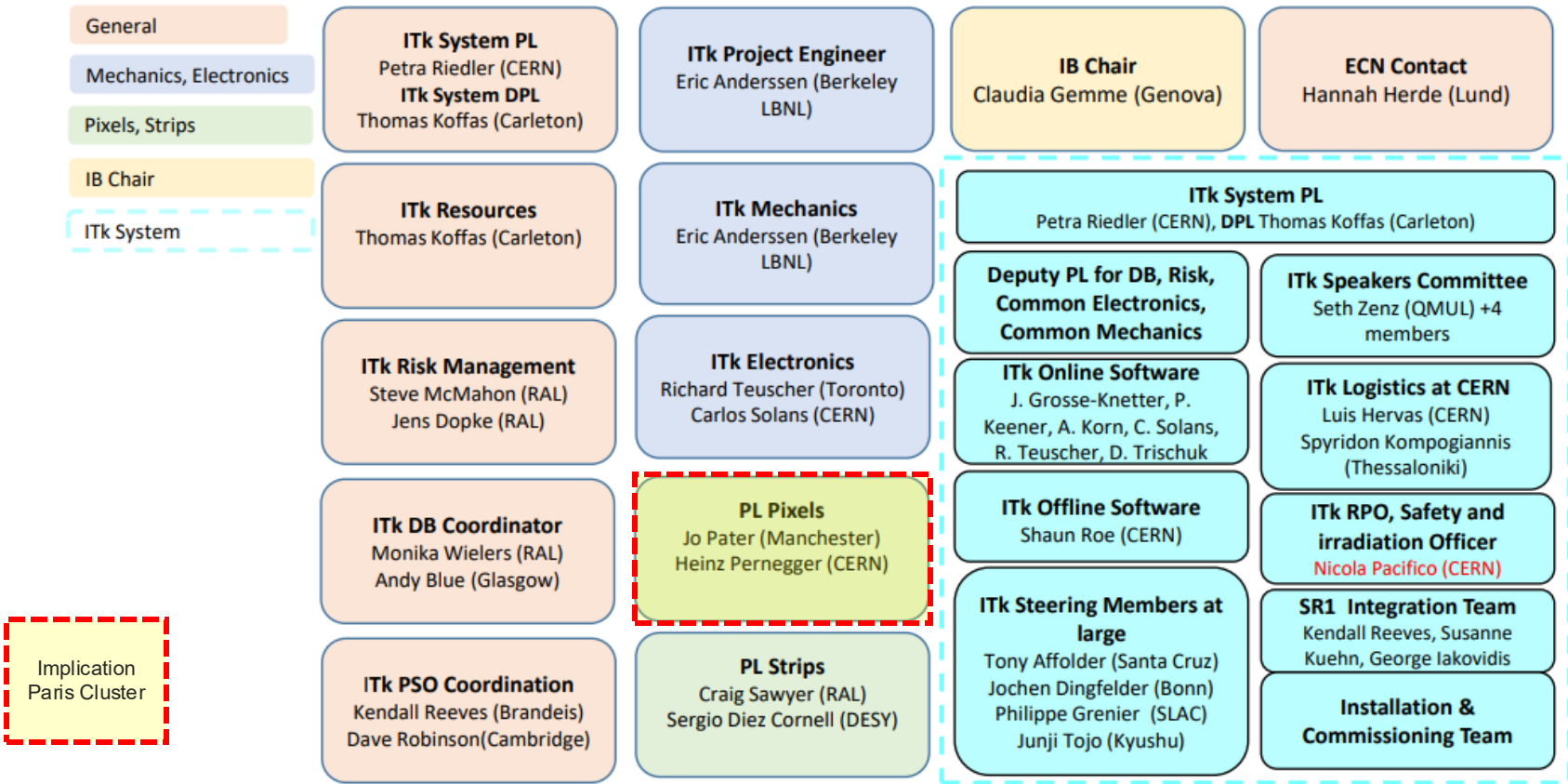
92 MPix  $\rightarrow$  5000 MPix (~500 TV 4K !!!)



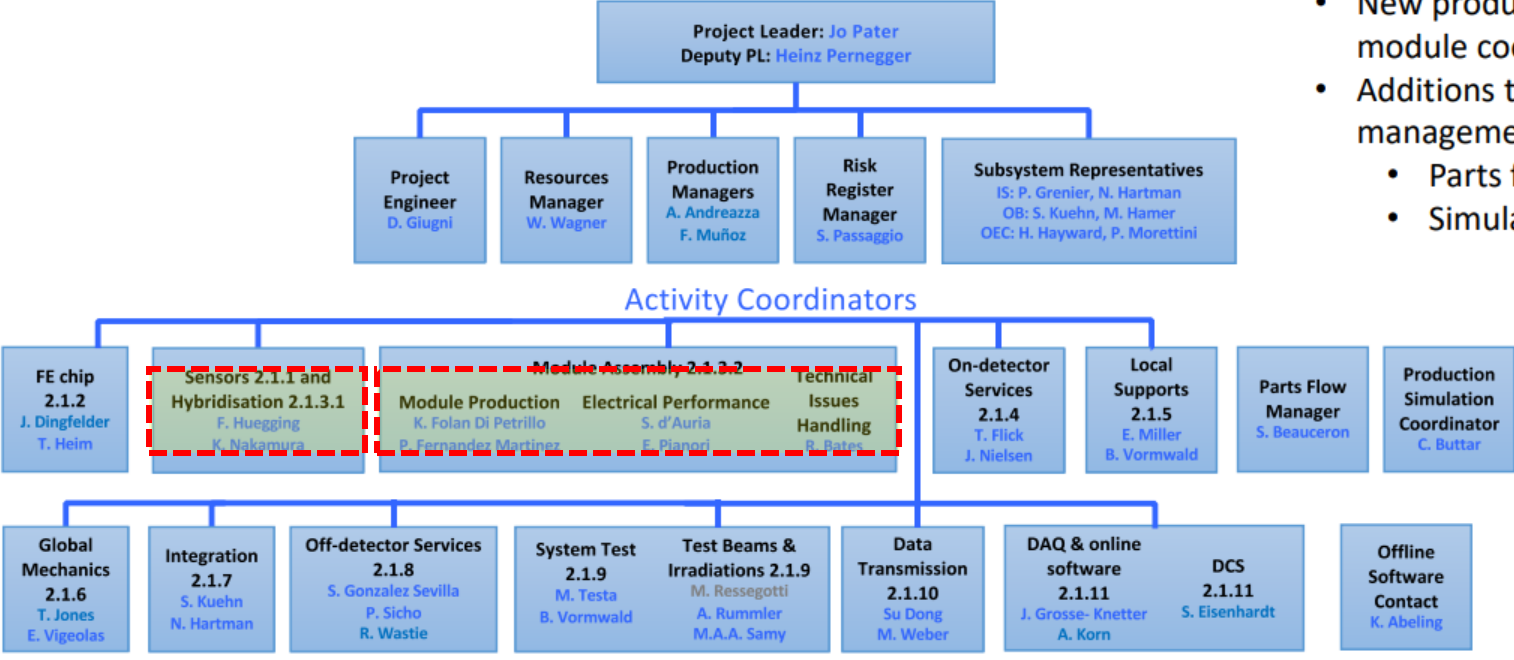
# ■ Une collaboration à la mesure de l'enjeu



# ATLAS-ITK – Organisation (April 1, 2025)



# ATLAS-ITK – Pixel - Organisation



## Recent changes:

- New production-oriented module coordination
- Additions to the production management team
  - Parts flow
  - Simulation



# ATLAS-ITK – Pixel - Collaboration

► 15 countries (without Russia) >> 62 labs

ATLAS COLLABORATION		CERN-MOU-2019-227	
ANNEX 1: List of Upgrade Institutes and Contact Persons			
Institutes by Funding Agency	Institute Short Name	Institute Representative	
<b>CERN</b>			
European Organization for Nuclear Research (CERN), Geneva	CERN	C. Rembser	
<b>Czech Republic</b>			
Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences, Prague	Prague AS	A. Kupco	
Czech Technical University in Prague, Prague	Prague CTU	Z. Hubacek	
<b>France CEA</b>			
IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette	Saclay CEA	C. Guyot	
<b>France IN2P3</b>			
LAPP, Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, Annecy	Annecy LAPP	E. Sauvan	
LPSC, Université Grenoble Alpes, CNRS/IN2P3, Grenoble INP, Grenoble	Grenoble LPSC	B. Tirocme	
CPPM, Aix-Marseille Université, CNRS/IN2P3, Marseille	Marseille CPPM	M. Barbero	
LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay	Orsay LAL	L. Iconomidou-Fayard	
LPNHE, Sorbonne Université, Université de Paris, CNRS/IN2P3, Paris	Paris LPNHE	D. Lacour	
<b>Germany BMBF</b>			
Physikalisches Institut, Universität Bonn, Bonn	Bonn	N. Wermes	
Lehrstuhl für Experimentelle Physik IV, Technische Universität Dortmund, Dortmund	Dortmund	K. Kroeninger	
II. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen	Göttingen	A. Quadt	
Department Physik, Universität Siegen, Siegen	Siegen	P. Buchholz	
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Fachgruppe Physik, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal	Wuppertal	W. Wagner	
<b>Germany MPI</b>			
Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut), München	Munich MPI	S. Bethke	
<b>Hong Kong</b>			
Department of Physics, Chinese University of Hong Kong, Shatin, N.T., Hong Kong	Hong Kong CUHK	L. Castillo	
Department of Physics, University of Hong Kong, Hong Kong	Hong Kong HKU	Y. Tu	
Department of Physics and Institute for Advanced Study, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong	Hong Kong HKUST	K. Prokofiev	
<b>Italy</b>			
INFN Sezione di Bologna; INFN Bologna and Università di Bologna, Dipartimento di Fisica	Bologna	B. Giacobbe	
INFN Gruppo Collegato di Cosenza, Laboratori Nazionali di Frascati; Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, Rende	Cosenza	M. Schioppa	
INFN e Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati	Frascati	M. Antonelli	
INFN Sezione di Genova; Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Genova	Genova	S. Passaggio	
INFN Sezione di Lecce; Dipartimento di Matematica e Fisica, Università del Salento, Lecce	Lecce	E. Gorini	
INFN Sezione di Milano; Dipartimento di Fisica, Università di Milano, Milano	Milano	G. Tartarelli	
INFN-TIFPA; Università degli Studi di Trento, Trento	Trento	G. F. Dalla Betta	

2019-10-29

Page 7 of 43

ATLAS COLLABORATION		CERN-MoU-2019-227	
<b>INFN Gruppo Collegato di Udine, Sezione di Trieste; Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, Università di Udine, Udine</b>	Udine	M. Cöbal	
<b>Japan</b>			
Research Center for Advanced Particle Physics and Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka	Kyushu	K. Kawagoe	
Kyoto University of Education, Kyoto	Kyoto UE	R. Takashima	
Graduate School of Science, Osaka University, Osaka	Osaka	H. Nanjo	
Ochanomizu University, Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo	Ochanomizu	T. Kono	
Graduate School of Science and Technology, Tokyo Metropolitan University, Tokyo	Tokyo MU	T. Kunita	
Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo	Tokyo Tech	O. Jinnouchi	
Waseda University, Tokyo	Waseda	K. Yoritaka	
KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba	KEK	K. Hanagaki	
Division of Physics and Tomonaga Center for the History of the Universe, Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba	Tsukuba	F. Ukegawa	
<b>Norway</b>			
Department for Physics and Technology, University of Bergen, Bergen	Bergen	B. Stugu	
Department of Physics, University of Oslo, Oslo	Oslo	F. Ould-Saada	
<b>Russia</b>			
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow	Moscow MEPhI	A. Romaniouk	
P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow	Moscow FIAN	K. Zhukov	
Konstantinov Nuclear Physics Institute of National Research Centre "Kurchatov Institute", PNPI, St. Petersburg	Petersburg NPI	O. Fedin	
<b>Slovenia</b>			
Department of Experimental Particle Physics, Jožef Stefan Institute and Department of Physics, University of Ljubljana, Ljubljana	Ljubljana	M. Mikuz	
<b>Spain</b>			
Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), Barcelona Institute of Science and Technology, Barcelona	Barcelona	M. Bosman	
<b>Switzerland</b>			
Albert Einstein Center for Fundamental Physics and Laboratory for High Energy Physics, University of Bern, Bern	Bern	M. Weber	
Département de Physique Nucléaire et Corpusculaire, Université de Genève, Genève	Genève	G. Iacobucci	
<b>United Kingdom</b>			
Particle Physics Department, Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, as part of United Kingdom, Research and Innovation	RAL	S. Haywood	
SUPA - School of Physics and Astronomy, University of Edinburgh, Edinburgh	Edinburgh	P. Clark	
SUPA - School of Physics and Astronomy, University of Glasgow, Glasgow	Glasgow	C. Buttar	
Physics Department, Lancaster University, Lancaster	Lancaster	R. Jones	
Oliver Lodge Laboratory, University of Liverpool, Liverpool	Liverpool	M. D'Onofrio	
School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, London	London QMUL	E. Rizvi	
Department of Physics and Astronomy, University College London, London	London UC	N. Konstantinidis	
School of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester	Manchester	A. Oh	
Department of Physics, Oxford University, Oxford	Oxford	I. Shipsey	
<b>US DOE</b>			

2019-10-29

Page 8 of 43

ATLAS COLLABORATION		CERN-MoU-2019-227	
<b>Department of Physics, University of Massachusetts, Amherst MA</b>	Massachusetts	S. Willocq	
High Energy Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne IL	Argonne	J. Zhang	
Physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory and University of California, Berkeley CA	Berkeley LBNL	K. Einsweiler	
Ohio State University, Columbus OH	Ohio SU	K. Gan	
Physics Department, Southern Methodist University, Dallas TX	Dallas SMU	R. Stroynowski	
Center for High Energy Physics, University of Oregon, Eugene OR	Oregon	J. Brau	
Department of Physics, University of Wisconsin, Madison WI	Wisconsin	S. Wu	
Homer L. Dodge Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, Norman OK	Oklahoma	P. Skubic	
Santa Cruz Institute for Particle Physics, University of California Santa Cruz, Santa Cruz CA	Santa Cruz UC	A. Selden	
Department of Physics, University of Washington, Seattle WA	Seattle Washington	H. Lubatti	
SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford CA	SLAC	D. Su	
Department of Physics, Oklahoma State University, Stillwater OK	Oklahoma SU	F. RizzatoInova	

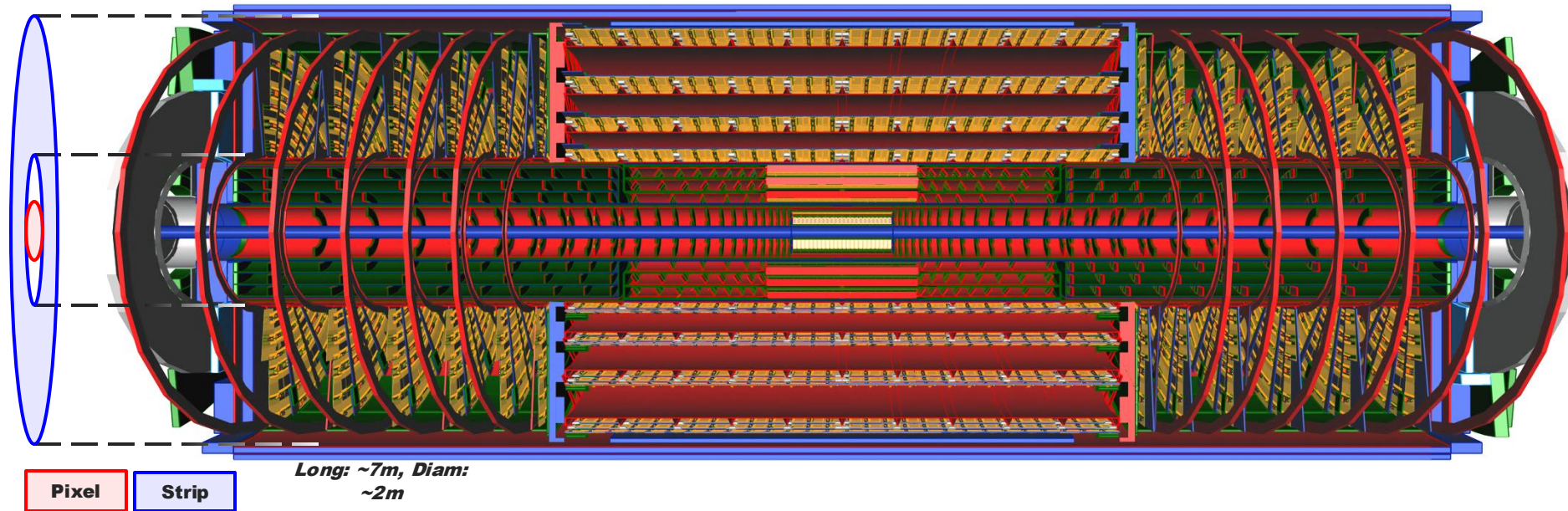


# ■ Outer Barrel

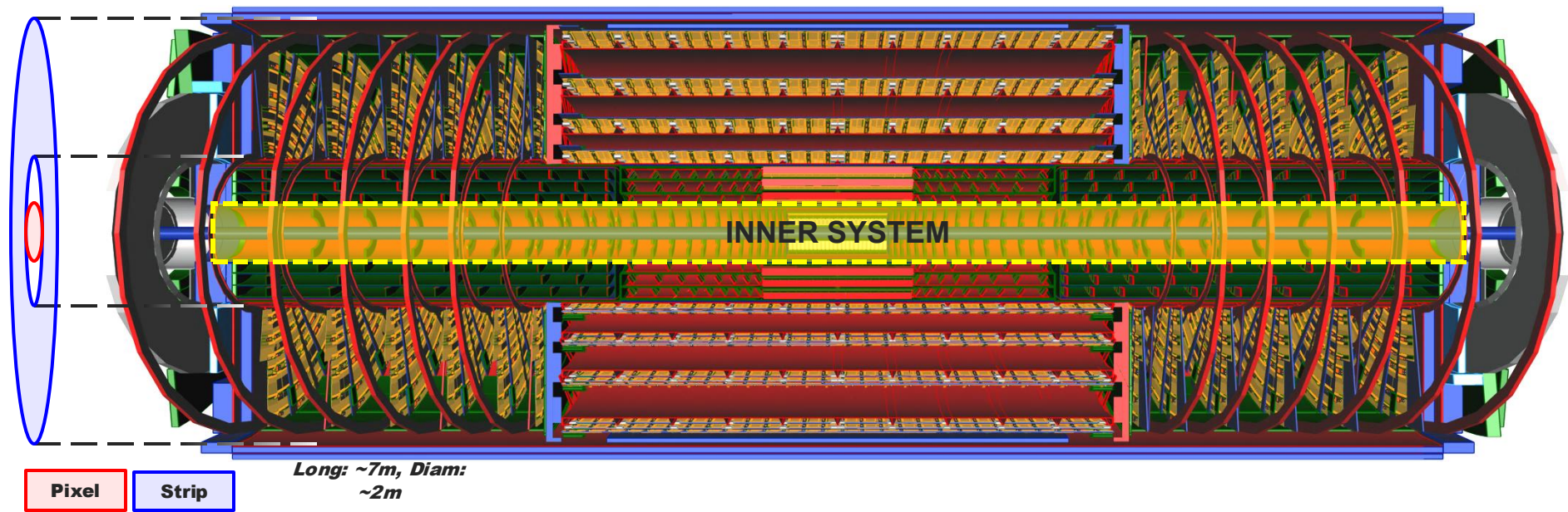
Où est-ce?



# Trajectographe ITk

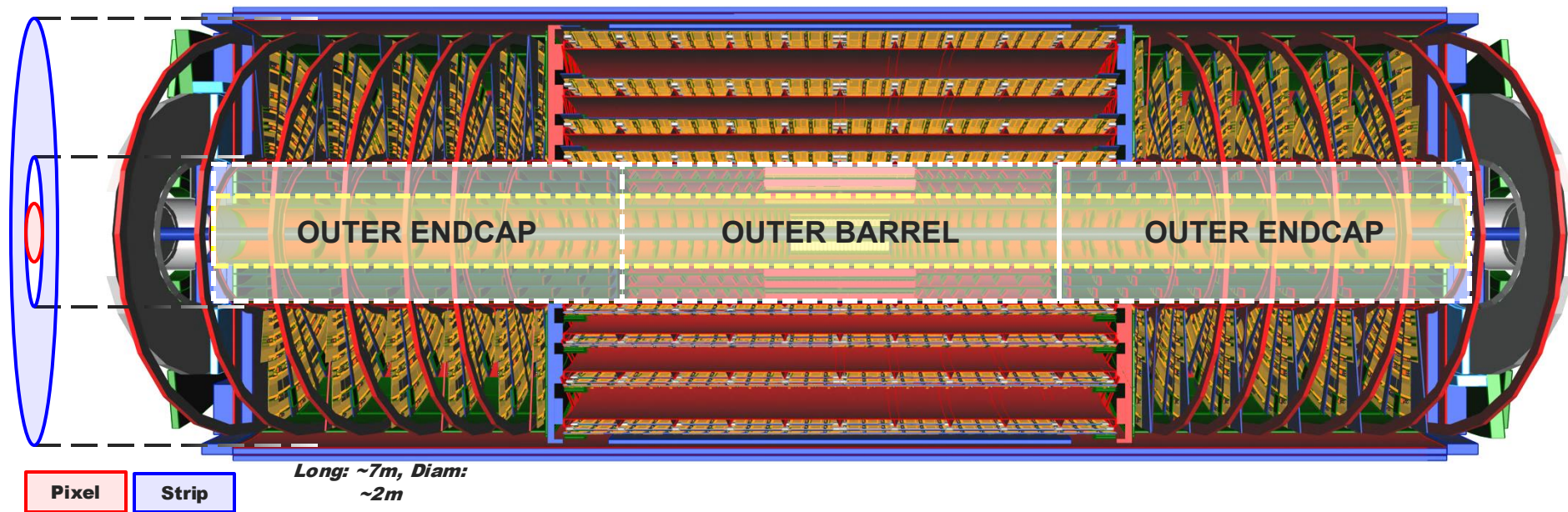


# Inner system





# Barrel & Endcaps



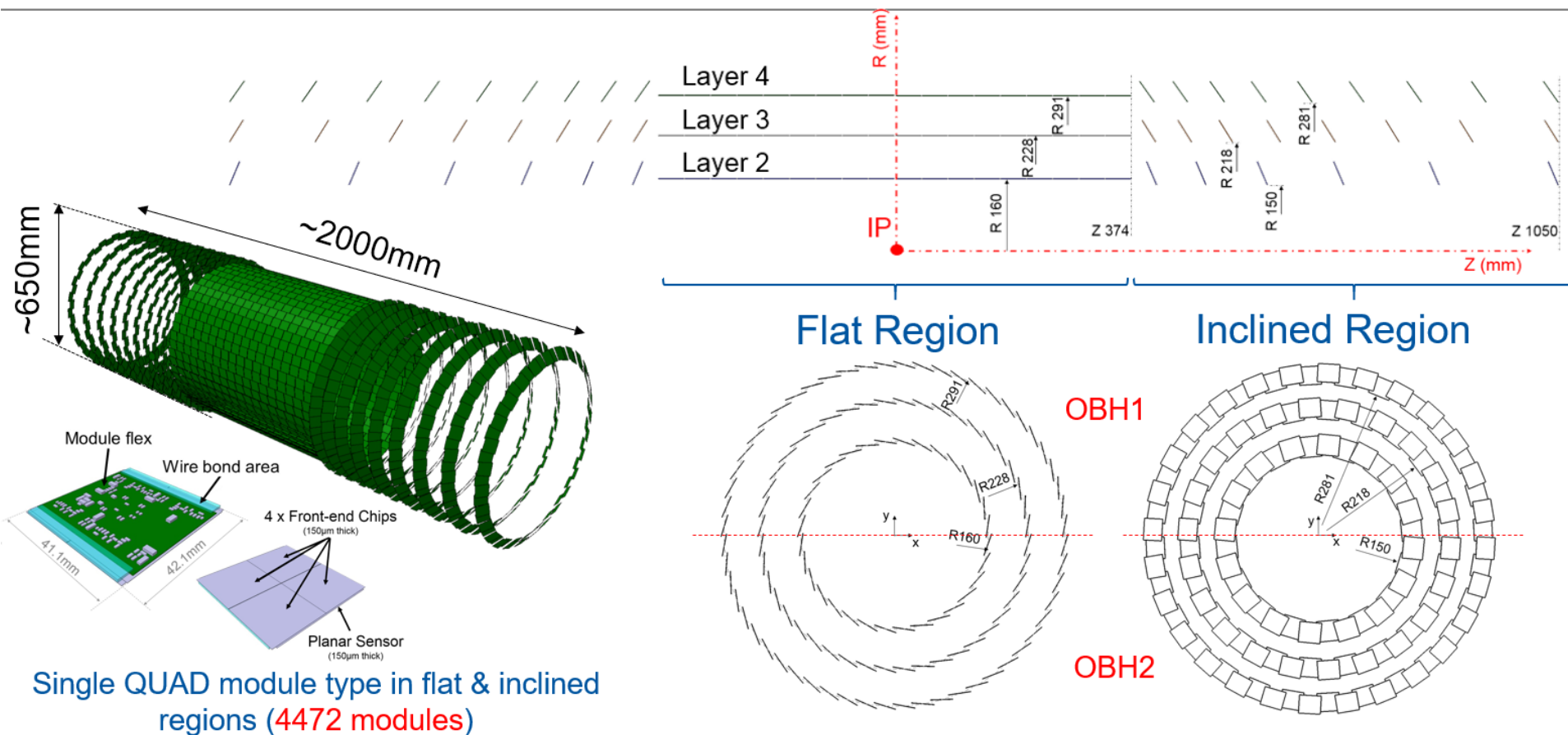


# ■ Outer Barrel

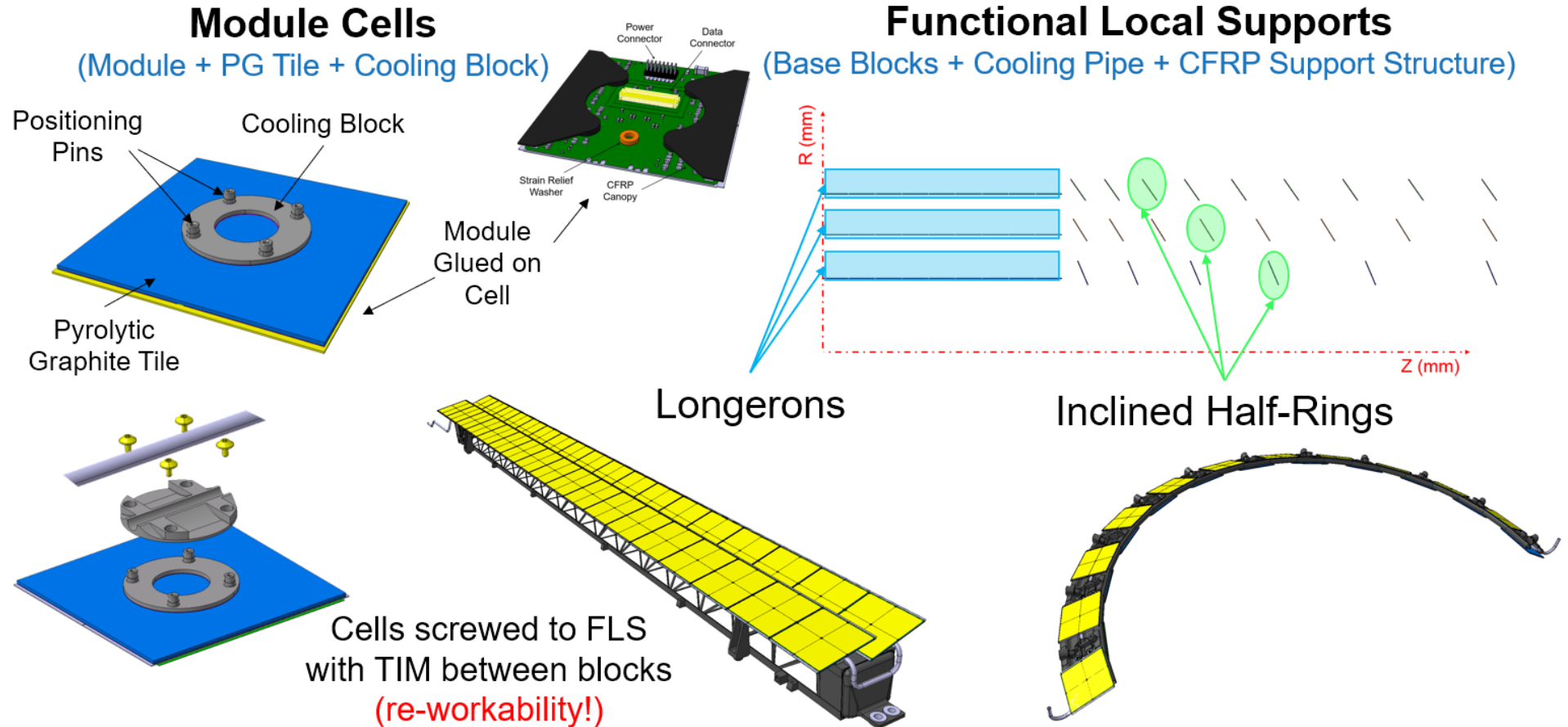
Composition générale



# Outer Barrel: Layout

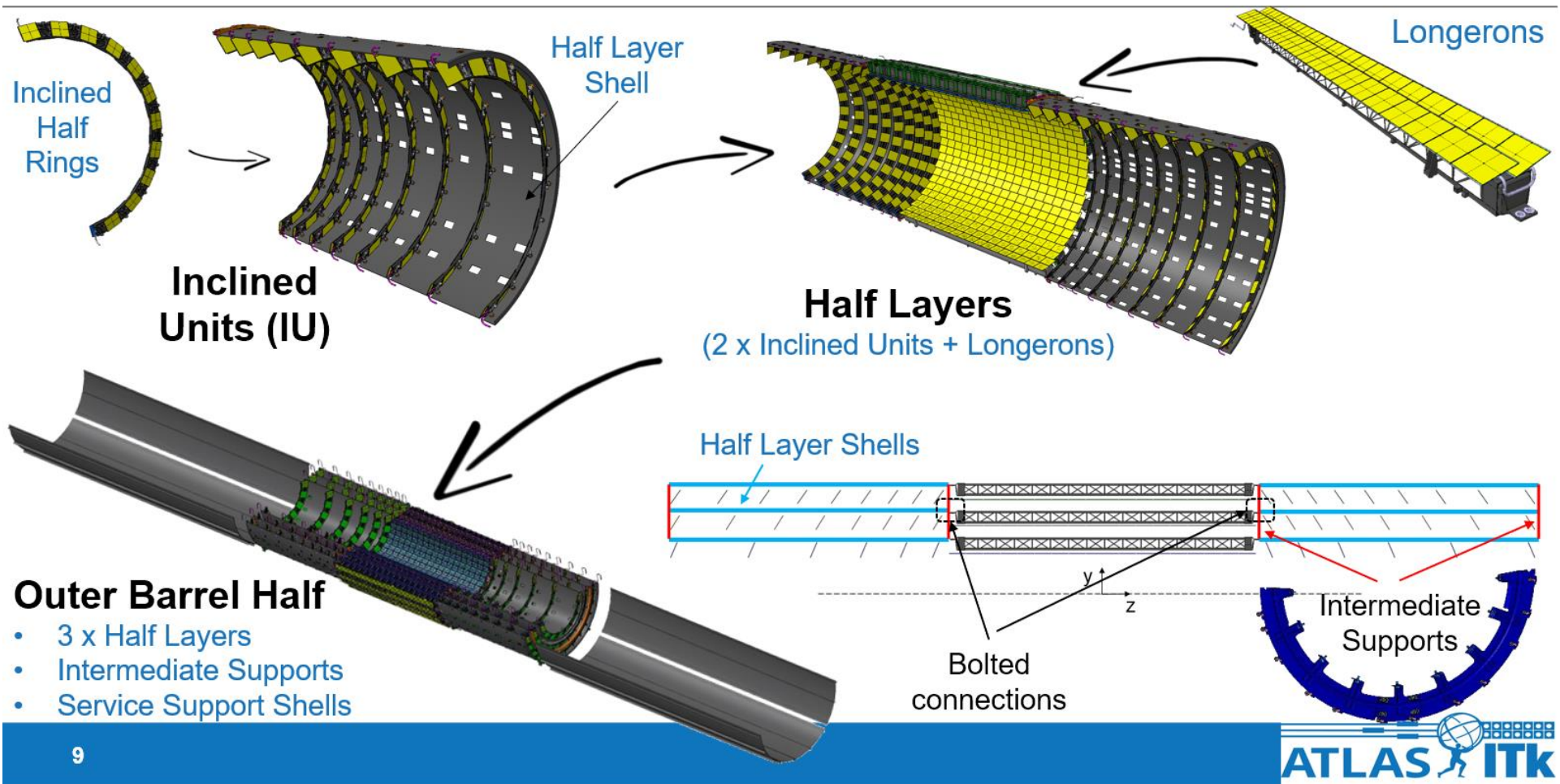


# Outer Barrel: Local Supports



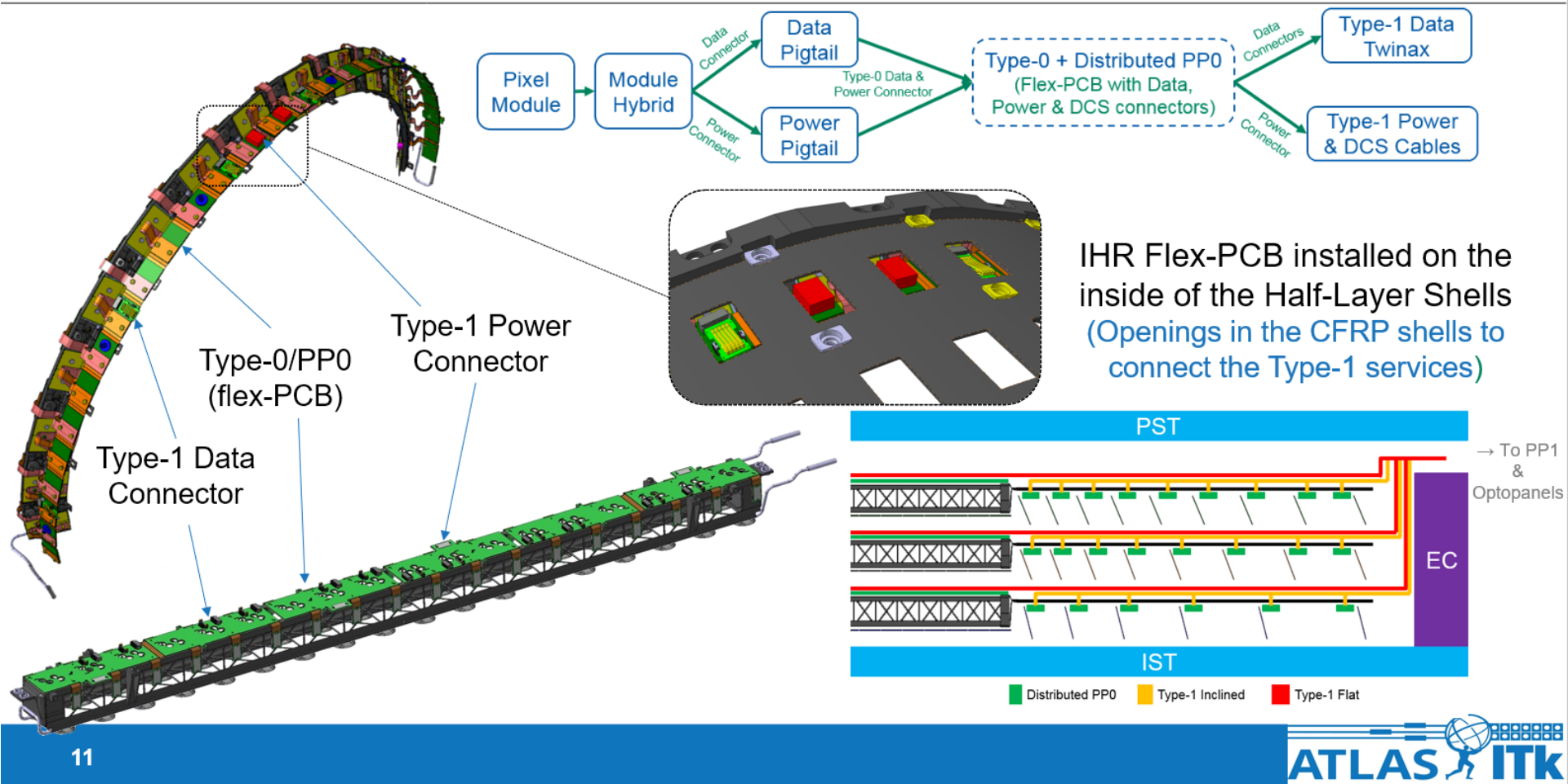


# Outer Barrel: Global Support Structures



9

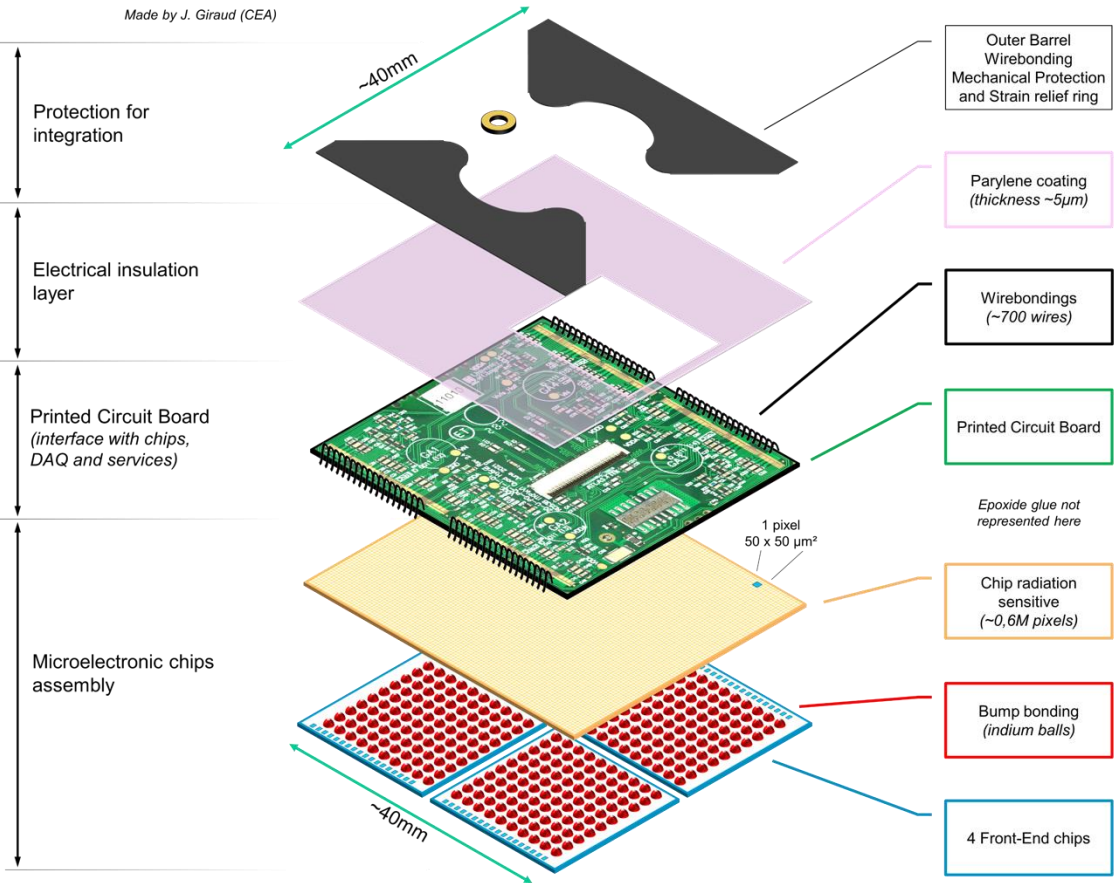
# Outer Barrel: Service Scheme



11



# Qu'est-ce qu'un module Pixel Quadruplet?



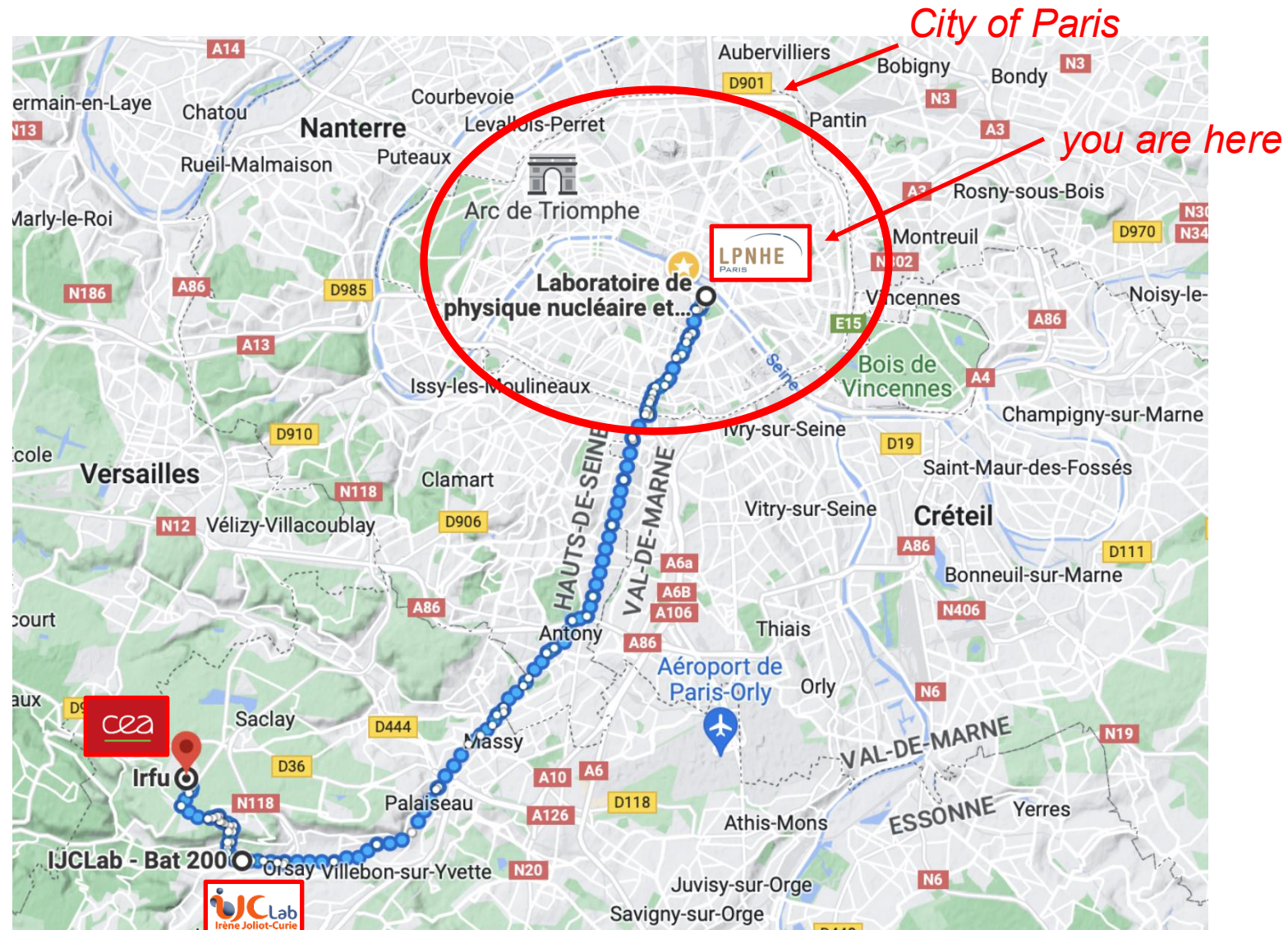
# Paris cluster



*Dimitris Varouchas (IJCLab)*



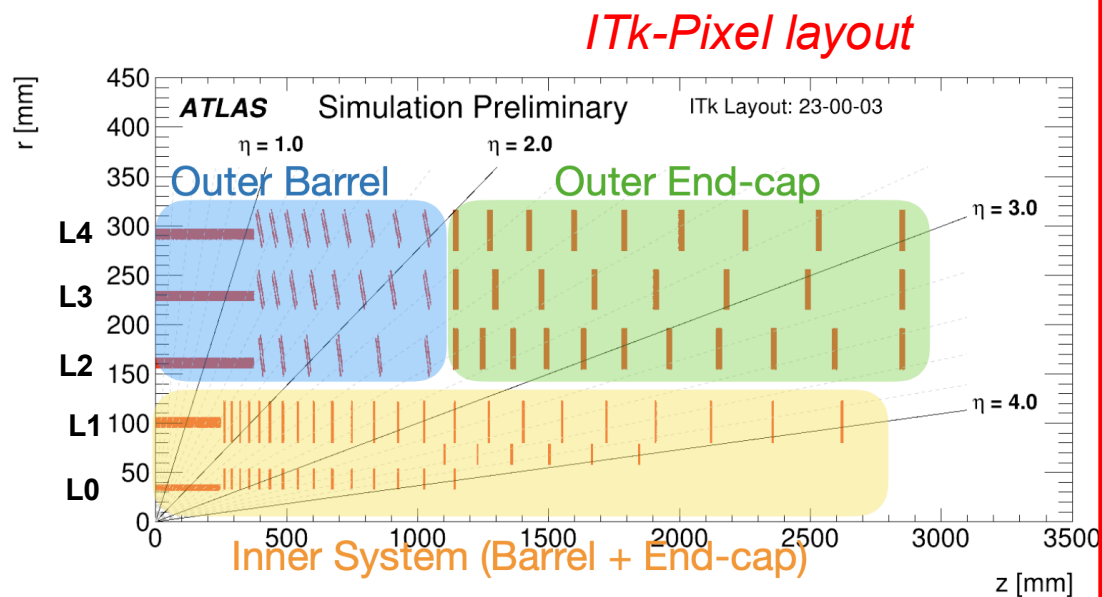
- **Paris cluster:** CEA-Irfu, IJCLab, LPNHE
- 3 ATLAS laboratories that work on ITk and are in Paris region
  - LPNHE – IJCLab: 25 km
  - LPNHE – CEA-Irfu: 29 km
  - IJCLab – CEA-Irfu: 5 km
- We work all together to deliver a big fraction of **good** Pixel-ITk modules to future ITk detector
- Pixel **module assembly** and **module testing** cluster
- Assembly + testing → production



- Paris cluster is an ITk-Pixel modules production site
- We are committed (MoU) in building 33% of the ITk-Pixel outer barrel (OB) modules
  - IN2P3 (IJCLab, LPNHE) 25%, CEA-Irfu 8%
  - In practise we share the tasks as evenly as possible among the 3 sites

[MoU](#)

- Outer barrel has **~4.5k installed good modules**
- Paris cluster share is 1/3 of outer barrel  $\Rightarrow$  **1.5k good modules**
- Taking into account the module production and loading/integration yield ( $\sim 1.5$ )
- **Paris cluster deliverable** including yield: **~2200 modules**

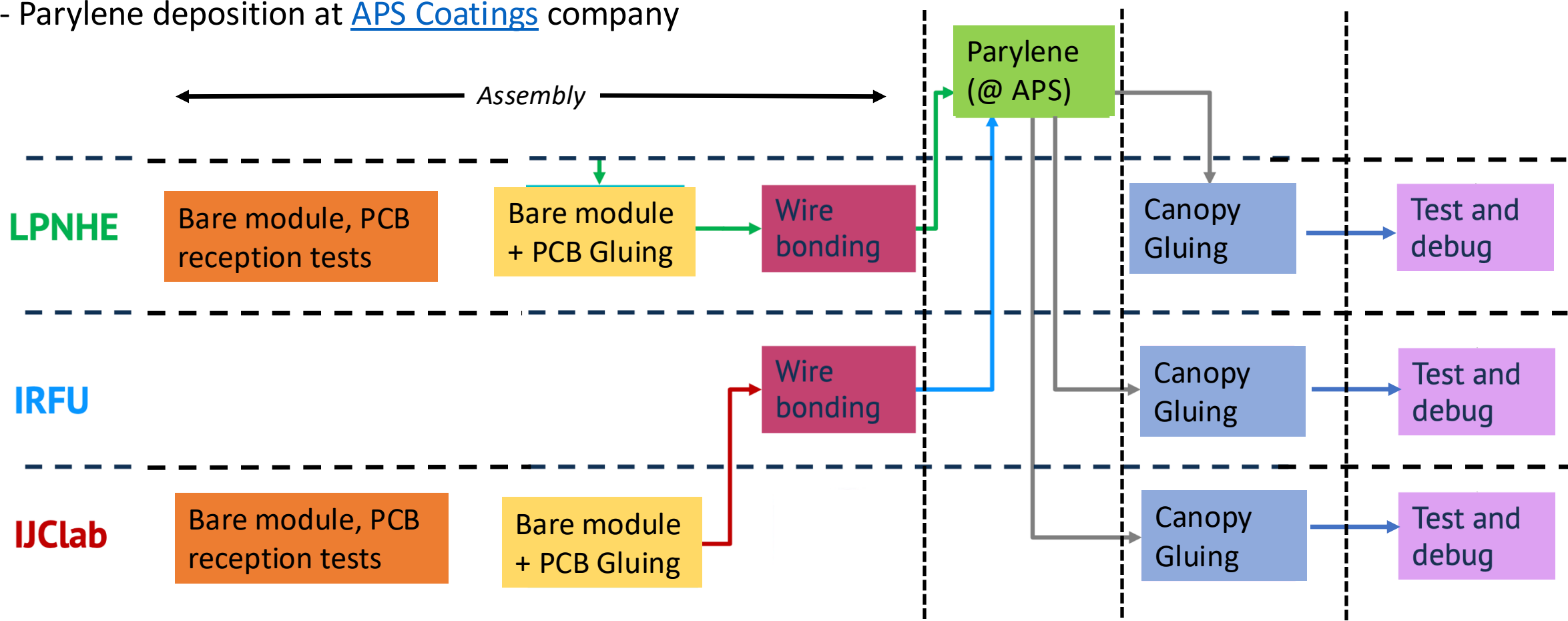


ATLAS COLLABORATION			
	Outer Barrel module assembly	End-Cap module assembly	Inner System module assembly
	2.1.3.2.2	2.1.3.2.2	2.1.3.2.2
CERN	18.0%		
Czech Republic			
France IN2P3	25.0%		
France CEA	8.0%		
Germany BMBF	29.0%		
Germany MPI			6.0%
Hong Kong			
Italy		14.5%	25.0%
Japan	20.0%	23.5%	
Netherlands			
Norway			15.0%
Russia		13.5%	
Spain			11.0%
Switzerland			
United Kingdom		48.5%	
USA DOE			43.0%
Total	100%	100%	100%

- In absolute numbers
  - We are building the **largest share of modules in OB**
  - Together with Japan (though they externalise), the **largest share of modules in ITk-Pixel**

# Paris cluster production diagram

- We maintain **two assembly lines**
  - A. IJClab – IRFU
  - B. LPNHE
- And **three canopy gluing and testing lines**
- Parylene deposition at [APS Coatings](#) company

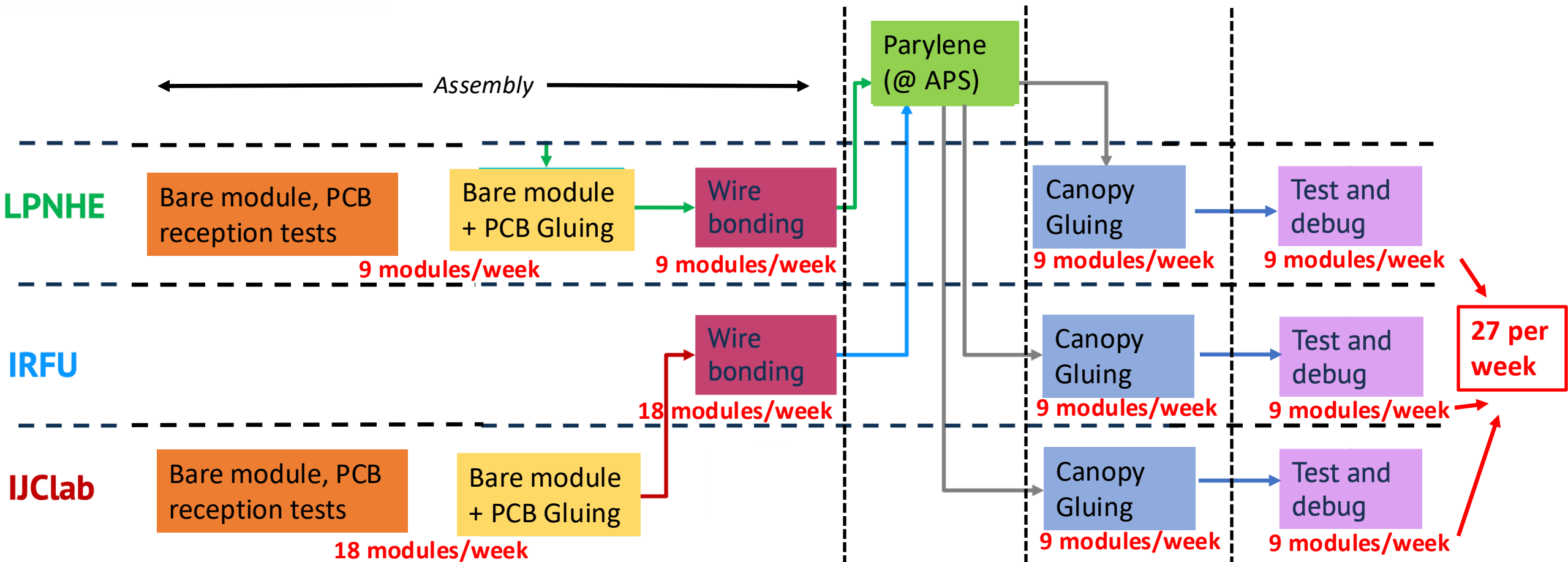




# **\*Nominal\* production plan**

- **Production period: 2 years**, assuming nominally 3 months off per year → **80 working weeks** in total
- Production started at T2 of 2025, but we are far from nominal production rate at the moment because of lack of good quality module components
- With the goal of having to produce **2200 modules** in Paris cluster
  - Nominal production rate target: **27 modules /week**

# Paris cluster \*nominal\* production rates



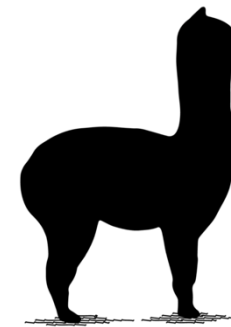
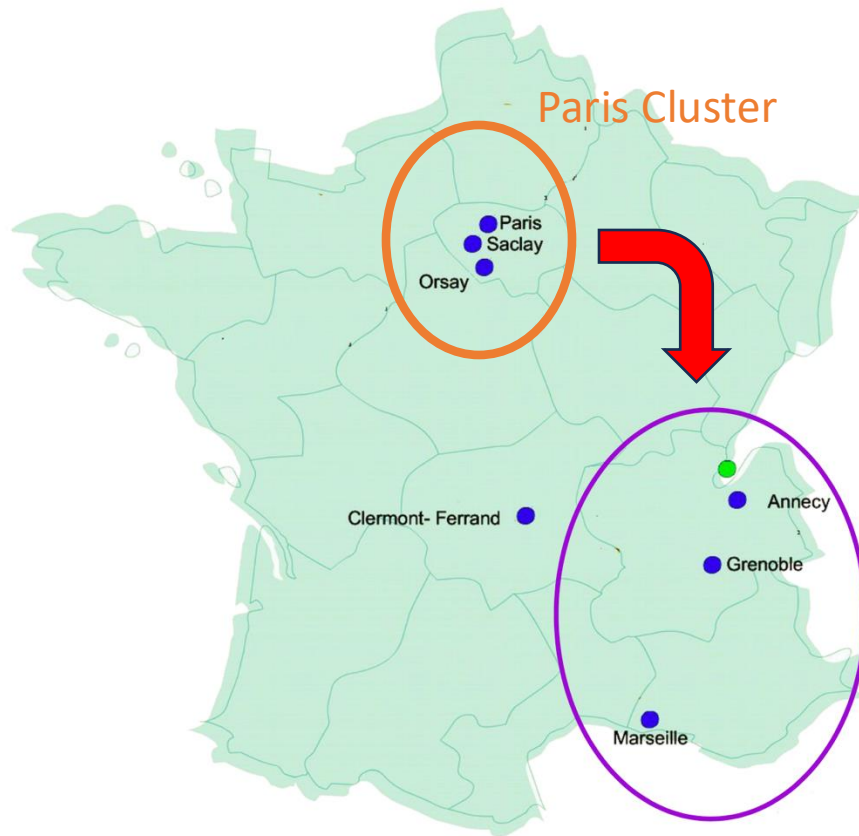
## Nominal share

- **LPNHE:** 1/3 at all steps
- **IJCLab:** 2/3 up to BM+PCB gluing, then 1/3 of canopies gluing and 1/3 of testing
- **CEA-Irfu:** 2/3 for wire bonding, then 1/3 of canopies gluing and 1/3 of testing

- Redundancy at every step
- 2 or 3 sites working **@ every step**

# Modules following Paris production

- Modules will be shipped to ALPACA cluster: CPPM (Marseille), LPSC (Grenoble), LAPP (Annecy)
- These 3 other French groups will perform the **cell loading** and integration to **local supports** of our modules

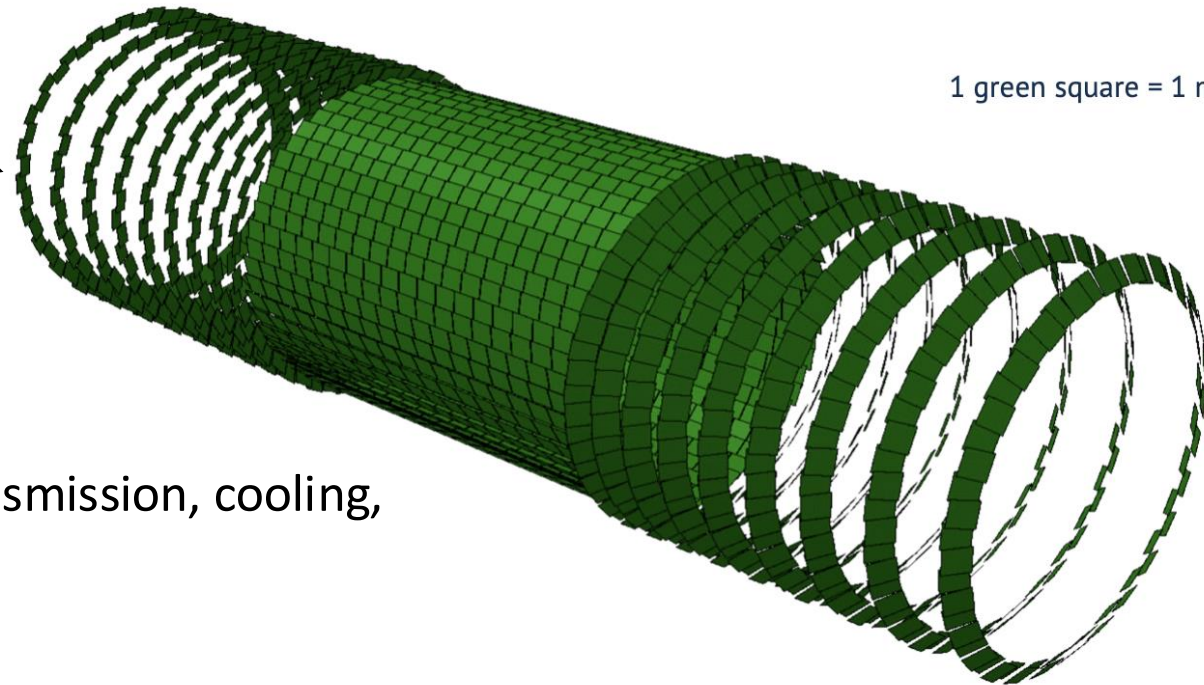


Alpaca  
Cluster



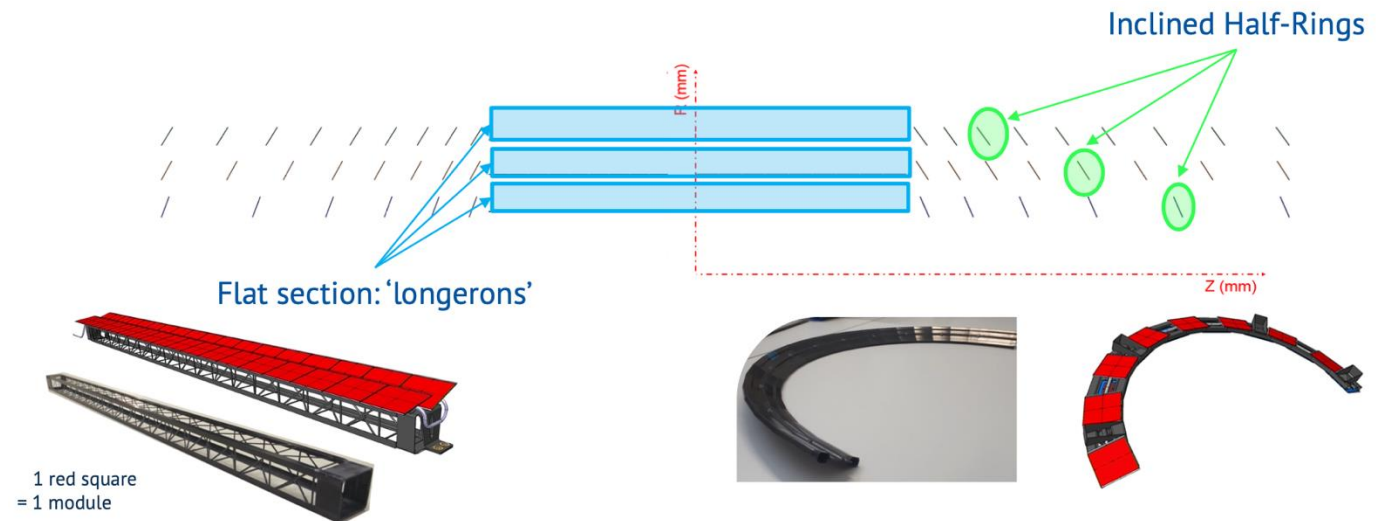


- This is how one layer of an ideal detector would like
- Only composed by our modules, floating in the air... ☺
- In practise, the modules should be mounted on supports (local supports)
- And all the services (power, data transmission, cooling, sensors) have to be installed



1 green square = 1 module

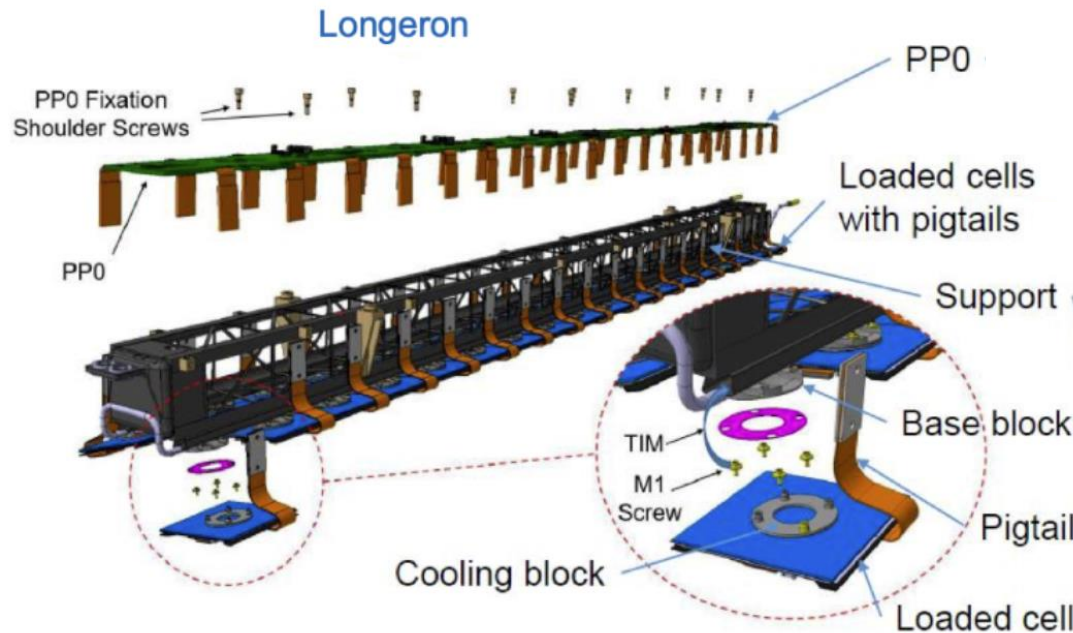
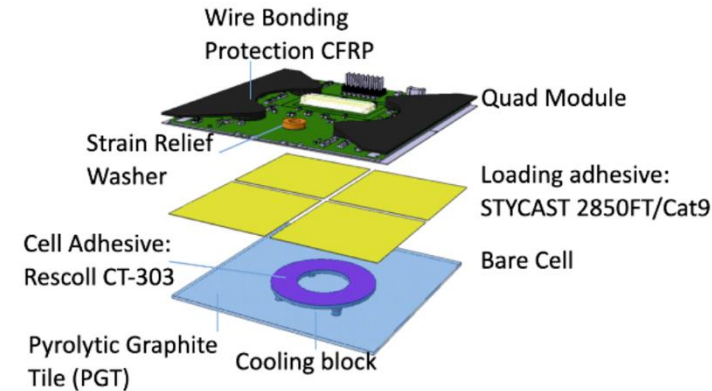
- Depending on the location of the module in the outer barrel, the local supports can be
  - Longerons (central part of the detector)
  - Half-rings for modules installed with an inclination



# Modules following Paris production

- Modules will be shipped to ALPACA cluster: CPPM (Marseille), LPSC (Grenoble), LAPP (Annecy)
- These 3 other French group will perform the **cell loading** and integration to **local supports** of our modules

- **Cell loading:** a structure with a cooling block (**cell**) is glued on the backside of the module (FE chip side); this explains why this side of the module has to be masked during parylene

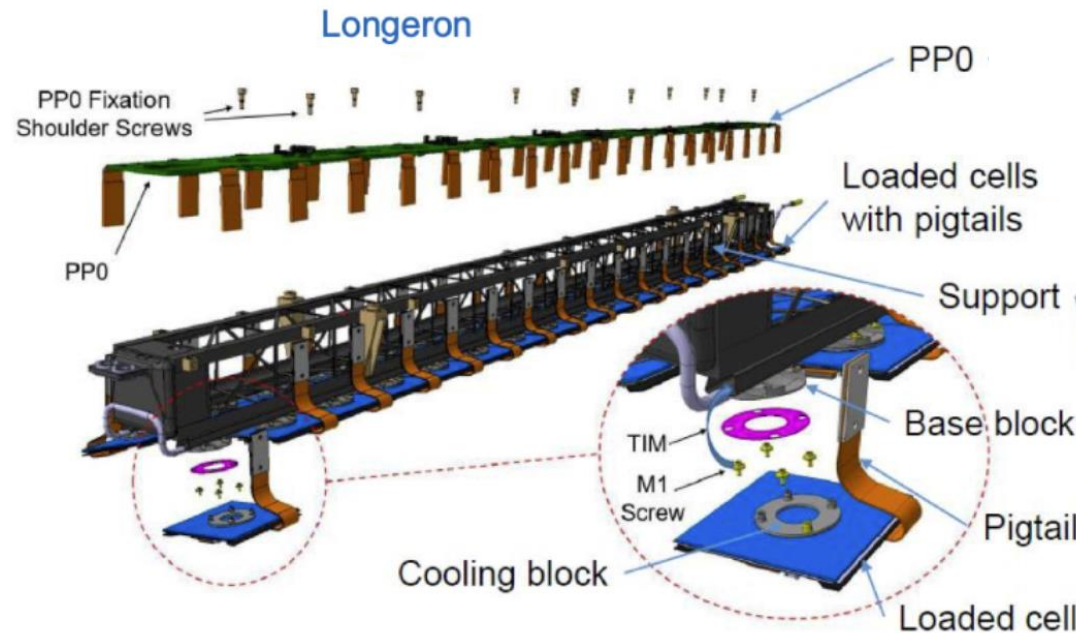
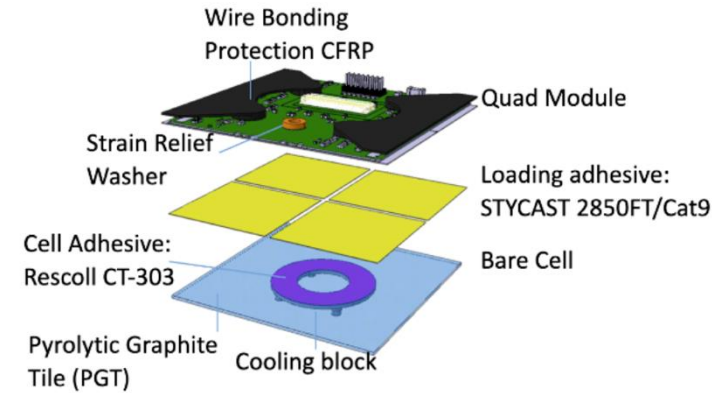


## Integration

- Loaded cells are attached to **local supports**
- Type-0 (PP0) services are installed
  - on-detector service directly attached to the pixel modules
- Power services, Data transmission, Cooling interfaces, etc

# Modules following Paris production

- Modules will be shipped to ALPACA cluster: CPPM (Marseille), LPSC (Grenoble), LAPP (Annecy)
- These 3 other French group will perform the **cell loading** and integration to **local supports** of our modules
- **Cell loading:** a structure with a cooling block (**cell**) is glued on the backside of the module (FE chip side); this explains why this side of the module has to be masked during parylene



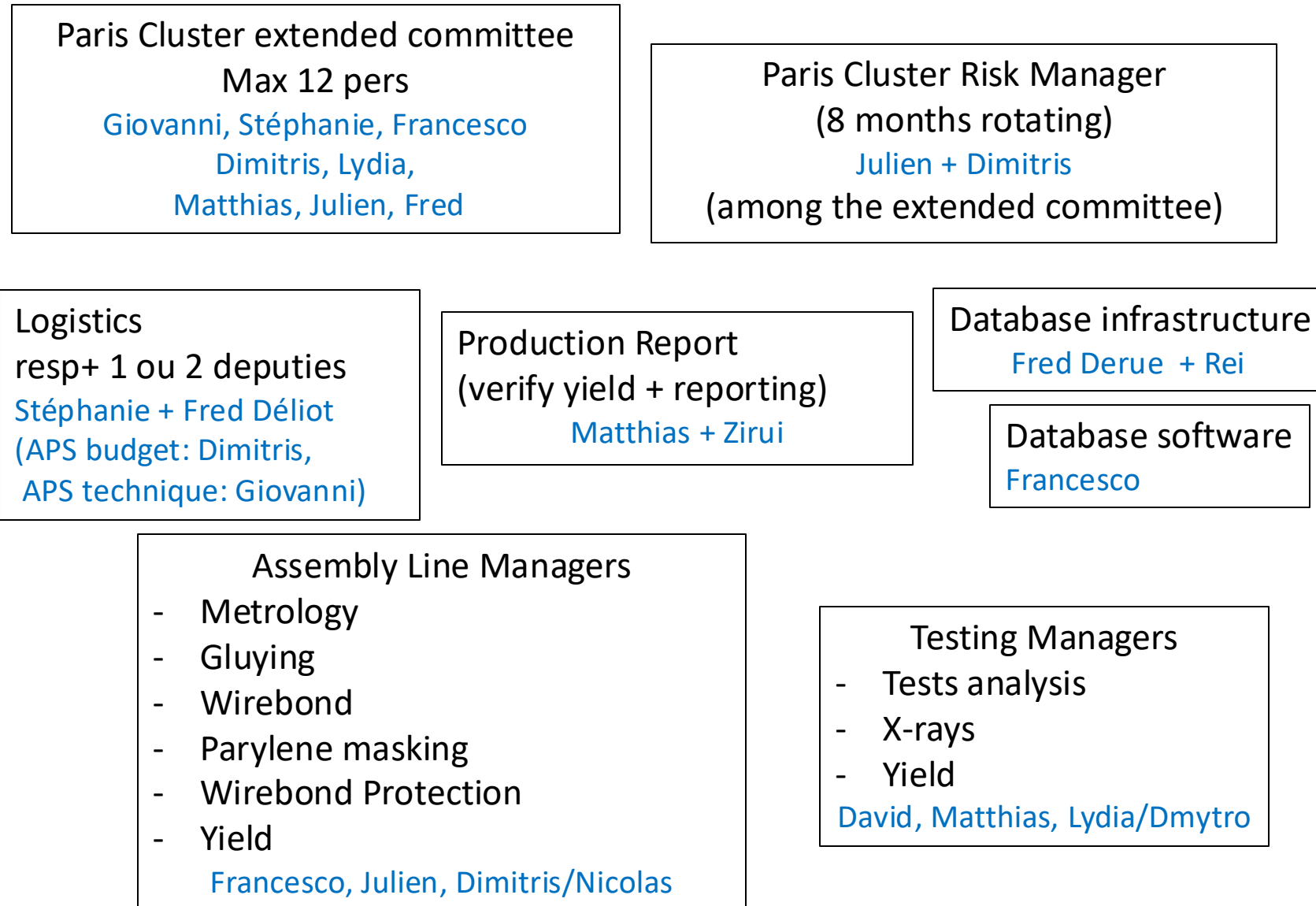
- After integration
  - Loaded local supports are tested
  - And finally they are shipped to CERN for the installation in the detector
- Still, long journey and tests for our modules after they leave Paris cluster

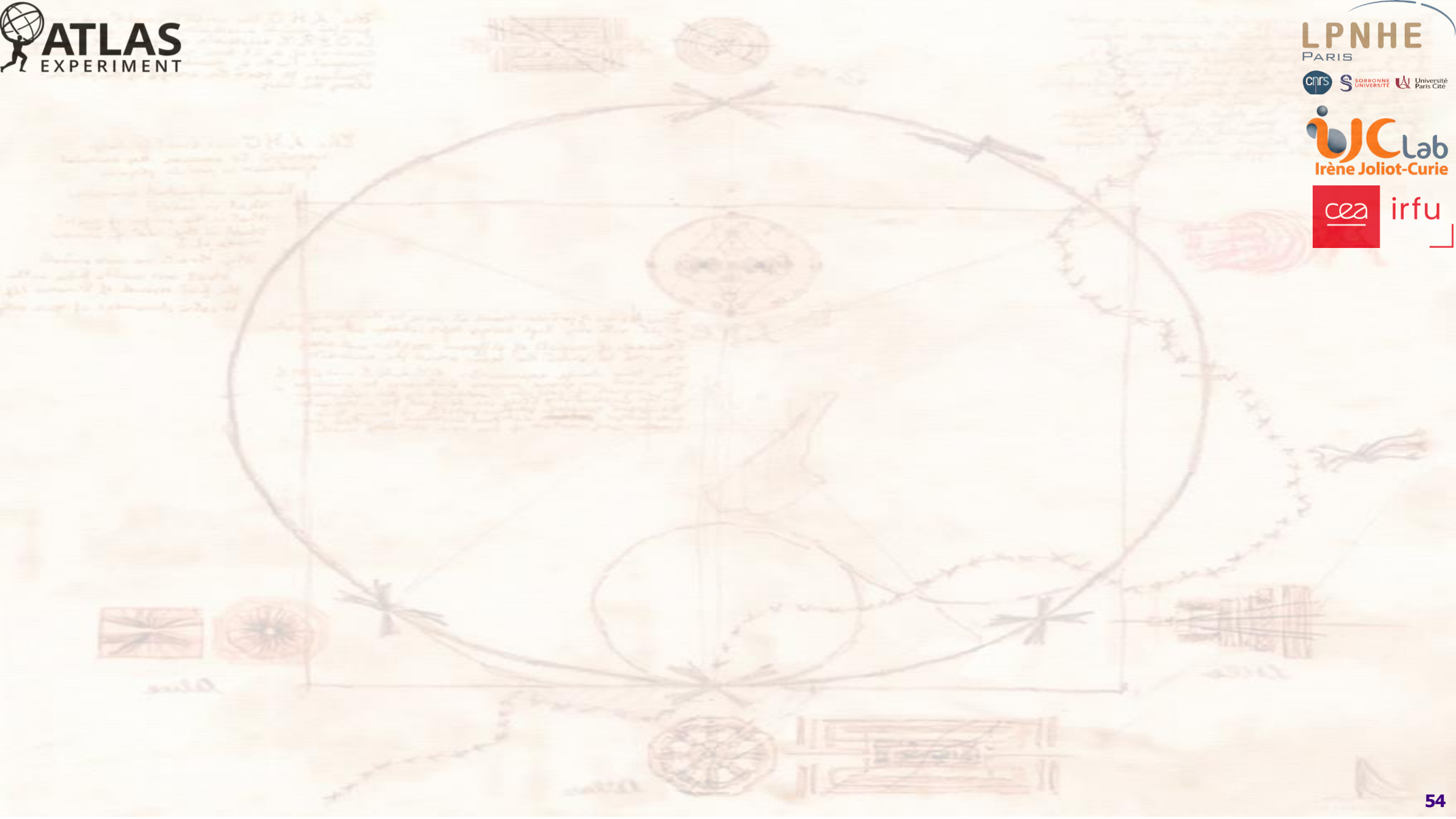


# Paris cluster, a few facts

- Undergone two joint IN2P3/IRFU reviews (2021 and 2024)
- ~ 30 FTEs in all 3 sites; **big fraction is IT**
- Weekly meetings: <https://indico.cern.ch/category/9094/>
- A pretty active mattermost group: <https://mattermost.web.cern.ch/itkpariscluster/>
- Exchange of expertise, we try to share the work as much as possible
- Common cluster Local (hosted at IJCLab) Data Base, where all members of cluster have access
- Common reporting in ITk Pixel meetings as much as possible, speakers rotation is being in place
- Numerous transfers of components, tools, modules, common material, etc. among the 3 sites over the years

# Paris cluster organization chart





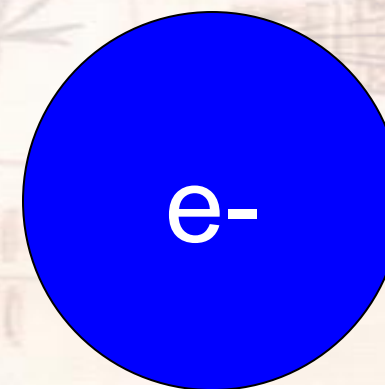
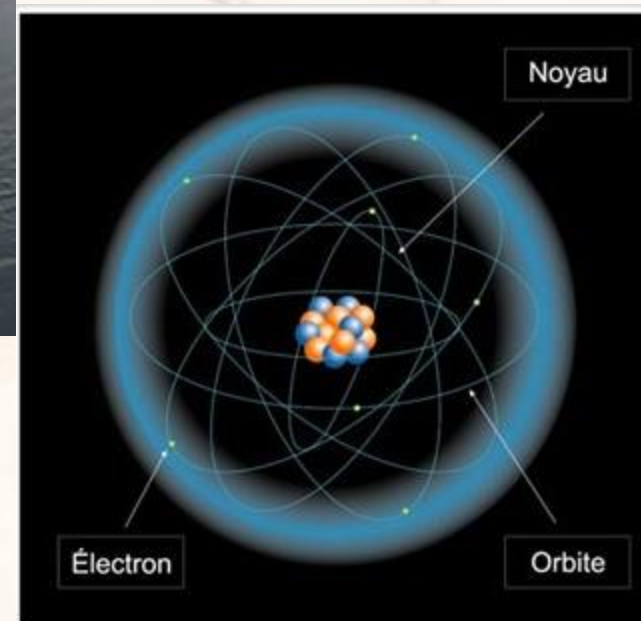


# L'interaction électromagnétique

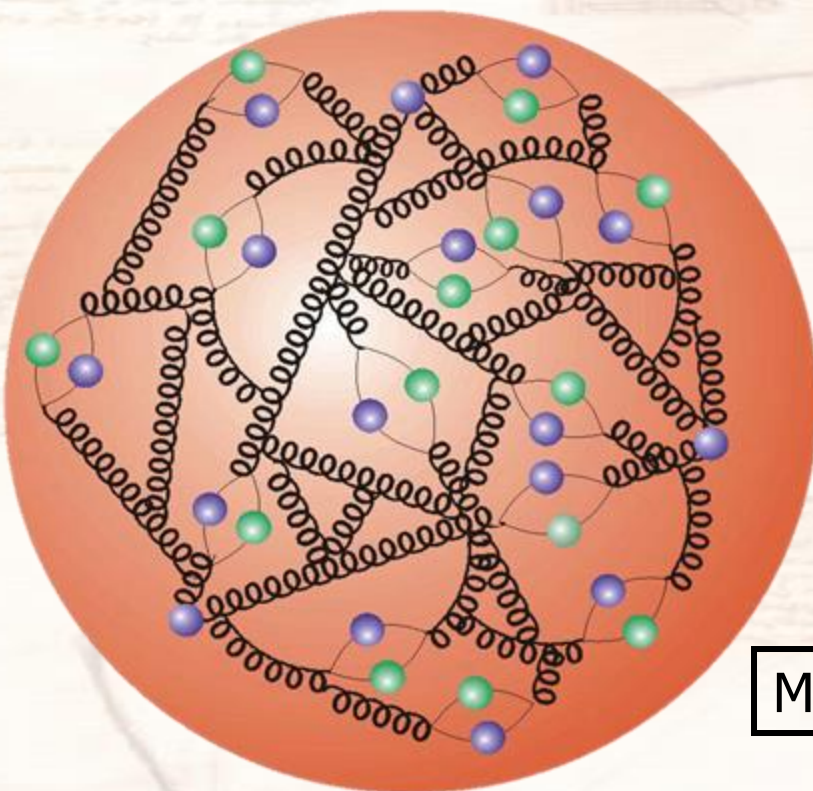
Responsable des phénomènes  
**électriques et magnétiques** :  
aimantation, lumière,  
cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de  
charges électriques identiques  
(attraction si charges opposées)

Médiateur (=boson) :  
**photon**



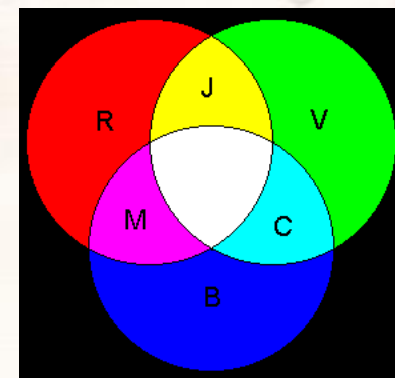
# L'interaction forte



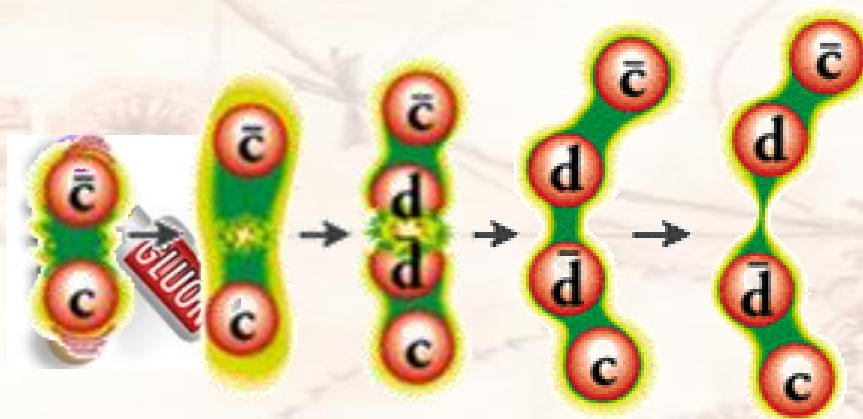
En plus de la charge électrique,  
les quarks portent une charge de couleur:

Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"



Médiateurs: **gluons**



Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...). On ne peut pas observer un quark seul.

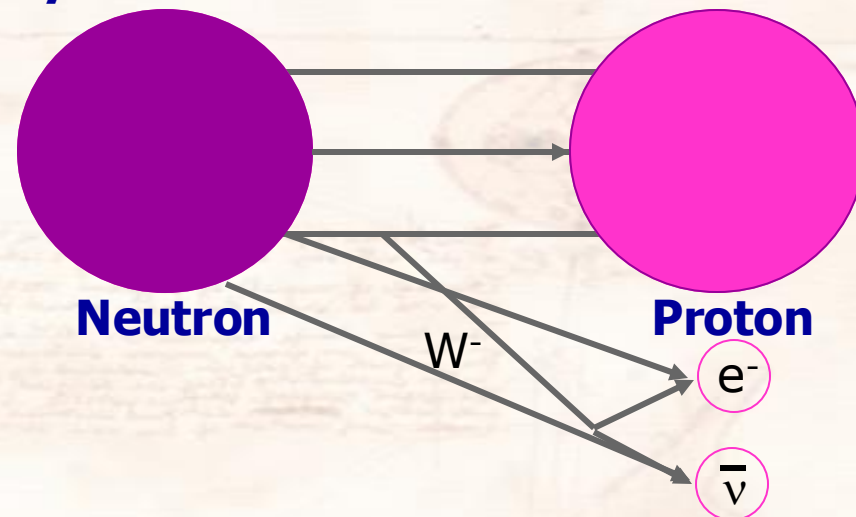
⇒ Stabilité des noyaux

⇒ Tout ce qui est constitué de quark s'appelle un hadron



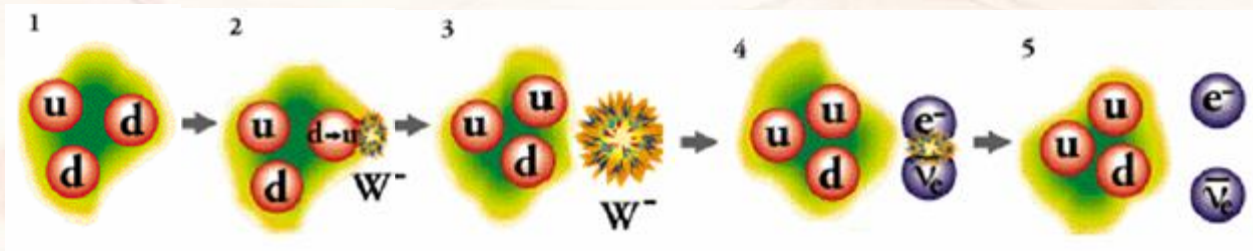
# L'interaction faible

**Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, se transforment spontanément en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers.**



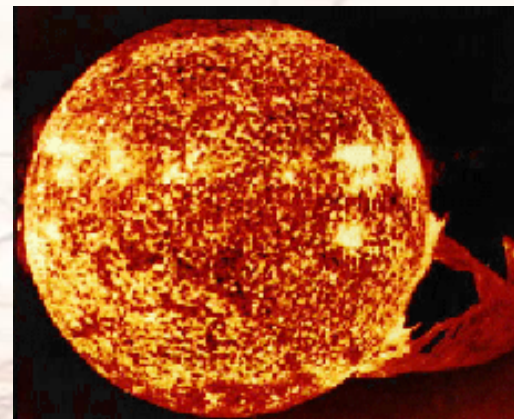
Médiateurs:  **$W/Z$**

**Un neutron (libre) se désintègre après 15 min**



**C'est un temps très long!!! (15min est une éternité en physique des particules!)  $\Rightarrow$  "faible"**

**sans ces interactions faibles le soleil s'éteindrait!**





# La gravité : une interaction à part...

Explique le phénomène de **pesanteur**  
(chute des corps terrestres)

Explique les orbites des planètes du **Système Solaire...** mais aussi les galaxies et l'évolution de l'Univers !



Portée : **infinie...**

Médiateur : **graviton ?** (non encore découvert)