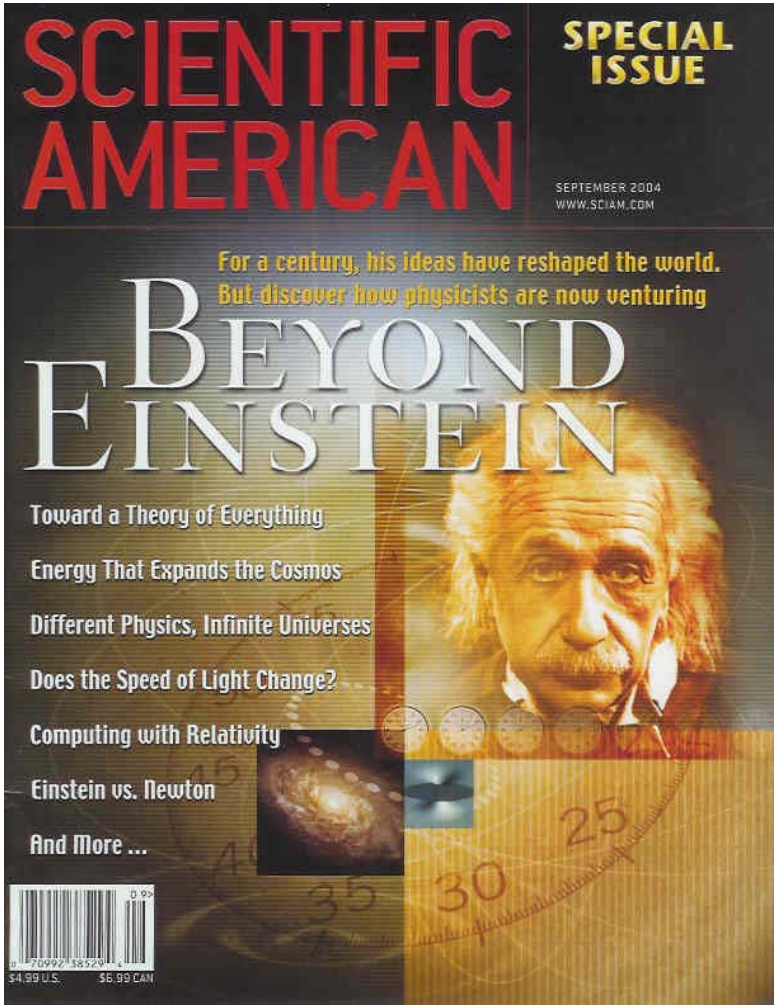
# 2005 Année internationale de la physique



# Pourquoi 1905 – 2005 ?

- Né 8 août 1876 (Mort 18 avril 1955)

- 1900 Enseigne maths à l'école secondaire technique Winterhur
- 1904 Bureau des brevets
- 1905 Thèse de doctorat, Université Zürich
- 1906 promu expert deuxième classe
- 1908 Privatdozent, Bern (au 2ième essai)
- 1909 8 juillet, PhD Honoris Causa Genève

  15 oct. professeur associé Zürich.

# Popularité (Google, 16 janvier 2005)

- Albert Einstein : 3,690,000
- Charles Darwin : 2,980,000
- Isaac Newton : 1,800,000

# Popularité (Google, 16 janvier 2005)

- Albert Einstein : 3,690,000
- Céline Dion : 2,460,000
- Winston Churchill : 2,260,000
- Adolf Hitler : 1,350,000
- Mahatma Gandhi : 572,000

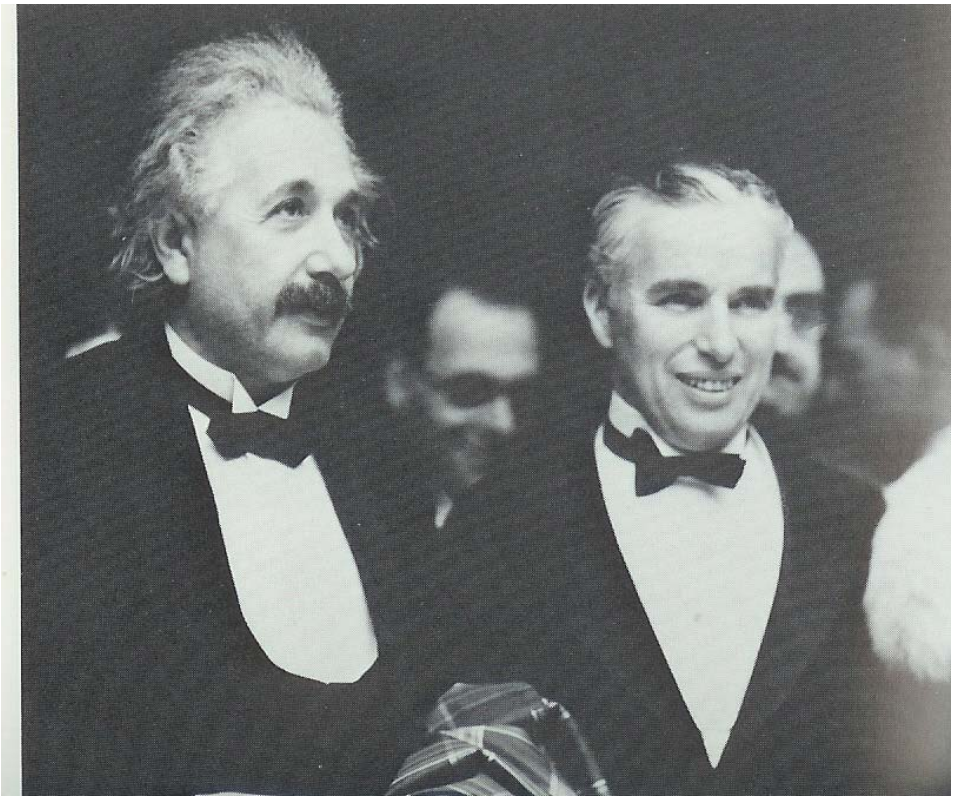
# Popularité (Google, 16 janvier 2005)

- Albert Einstein : 3,690,000
- Saddam Hussein : 4,280,000
- Buddha : 6,920,000
- Jesus : 13,150,000
- George Bush : 16,800,000

# Pourquoi cette popularité ?

- 1916 Émission stimulée (laser)
- 1916 Relativité générale (gravitation)
- 1919 en mai, expériences de Eddington et Crommelin sur la déviation des rayons lumineux par le soleil observée pendant une éclipse
- 7 novembre, *London Times*
- 10 novembre, *New York Times*
- Prend la place de Newton !

# Pourquoi cette popularité ?



- Besoin de se réunir après la première guerre mondiale
- Relativité… aspects philosophiques. Théorie des invariants.

# 1905, l'année miracle

- 17 mars, **les quanta**
- 30 avril PhD "Sur la détermination des dimensions moléculaires"
- 11 mai, le **mouvement Brownien**
- 30 juin, **la relativité**
- 27 septembre, $E=mc^2$
- 19 décembre, mvt brownien encore.

# Plan

- Avant, après, aujourd'hui
  - Les quanta
  - Le mouvement Brownien
  - La relativité
  - 1906 Théorie quantique des solides
- Einstein après 1919

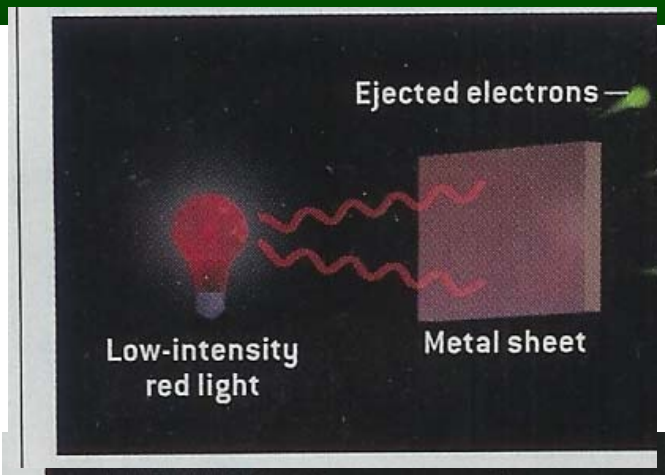
- La supraconductivité
- Et à Sherbrooke

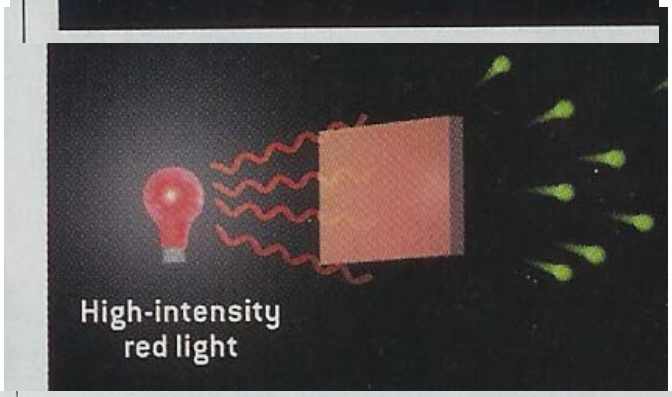
# 17 mars 1905, l'effet photoélectrique

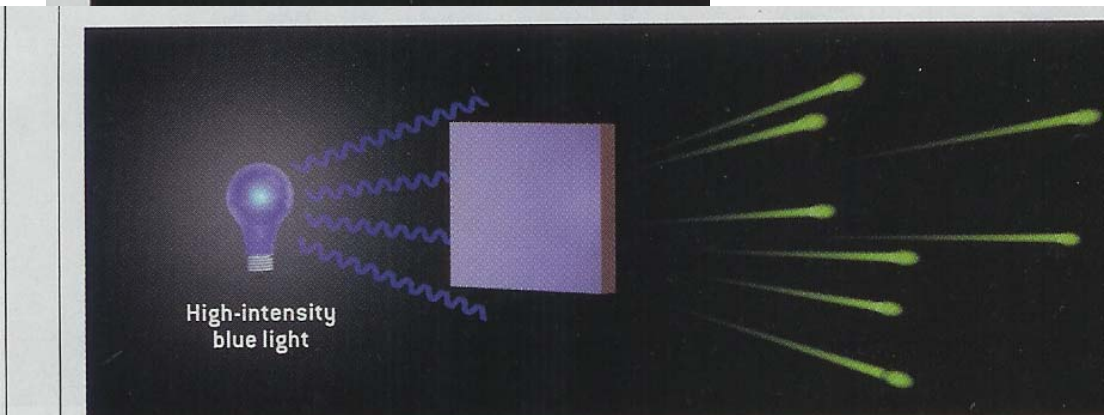
Débuts de la mécanique quantique

Le photon

# 17 mars 1905, l'effet photoélectrique

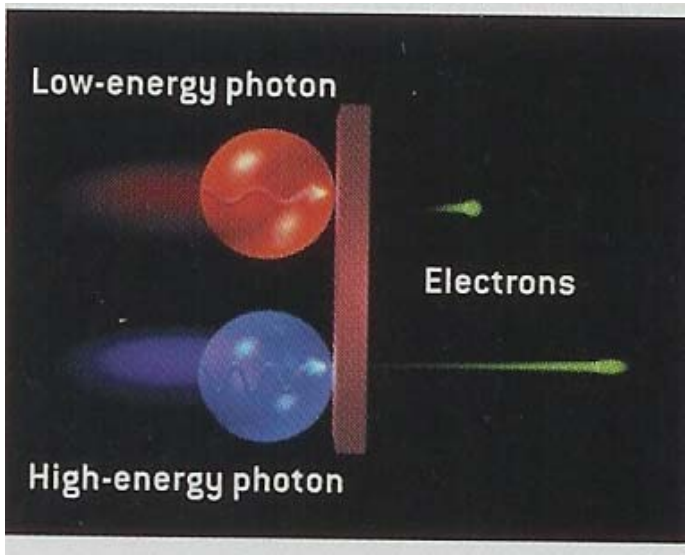



- Gustav Hertz 1887
- Philip Lennard 1902

$$E = h\nu - W$$



# 17 mars 1905, l'effet photoélectrique

ERSITÉ DE
ERBROOKE

# 11 mai 1905, le mouvement Brownien

Réalité des atomes, *(cf Feynman)*

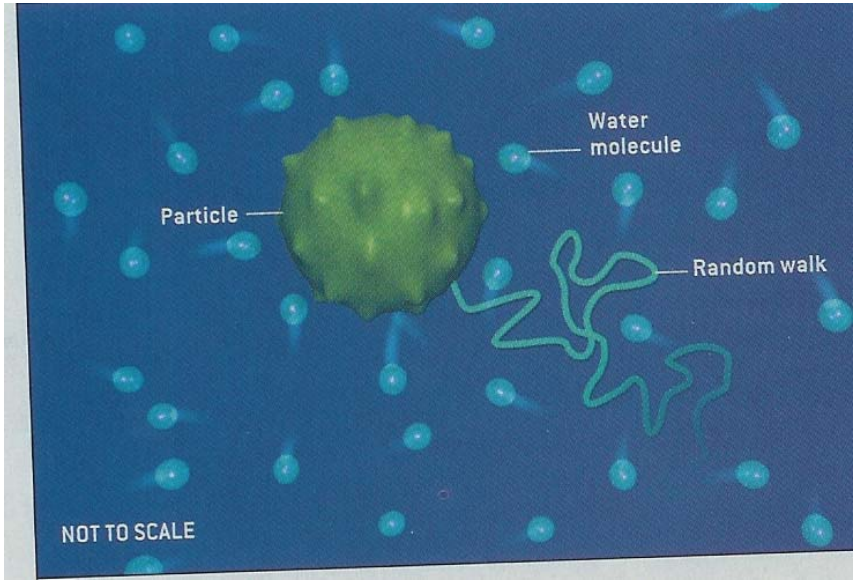
Théorie statistique de la chaleur

# Avant le 11 mai 1905

- La théorie atomique explique bien les réactions chimiques (Dalton et autres)

- Physique statistique, 1850, (Maxwell, Boltzmann, Clausius…)

# 11 mai 1905, le mouvement Brownien



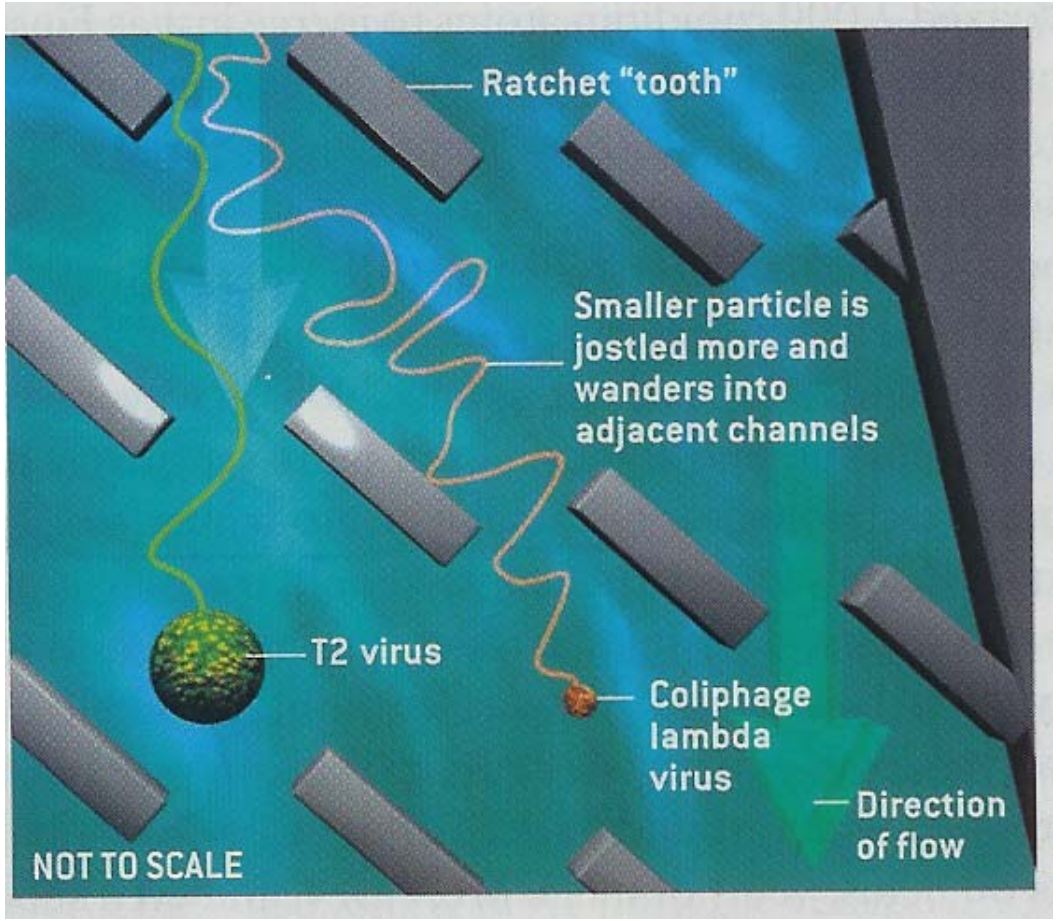
- Buffon, Spalazzani, Robert Brown, botaniste 1828 (noyaux cellules végétales)

Marche aléatoire (Théorème de la limite centrale)

$$<(\Delta x)^2> = Dt$$

$$D = \frac{RT}{N_a}\frac{1}{6\pi\eta a}$$

# Le mouvement Brownien aujourd'hui



# 30 juin et 27 septembre 1905, la relativité

Théorie de l'espace-temps

$E=mc^2$

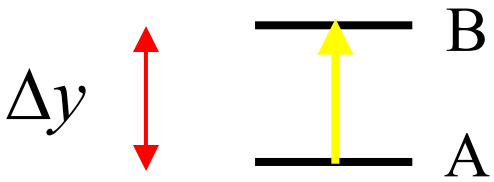
# Avant la relativité

- Principe de la relativité par Galilée
  - Les lois de la physique (Newton) sont les mêmes dans tous les référentiels se déplaçant à vitesse constante l'un par rapport à l'autre

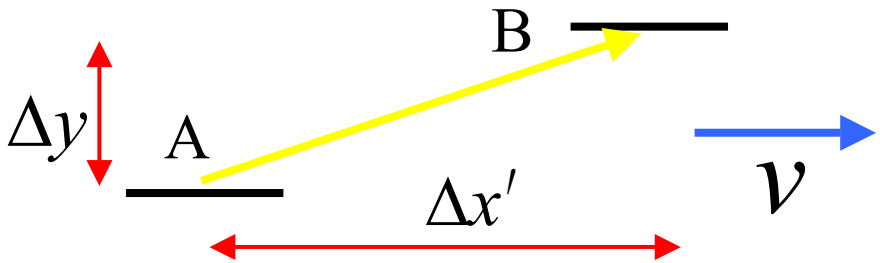
- Équations de Maxwell contiennent la vitesse de la lumière ?

# 30 juin 1905, la relativité

- La vitesse de la lumière $c$ est invariante




$$c\Delta t = \Delta y$$




$$(c\Delta t')^2 = (\Delta x')^2 + (\Delta y)^2$$

$$(c\Delta t')^2 = (v\Delta t')^2 + (\Delta y)^2$$

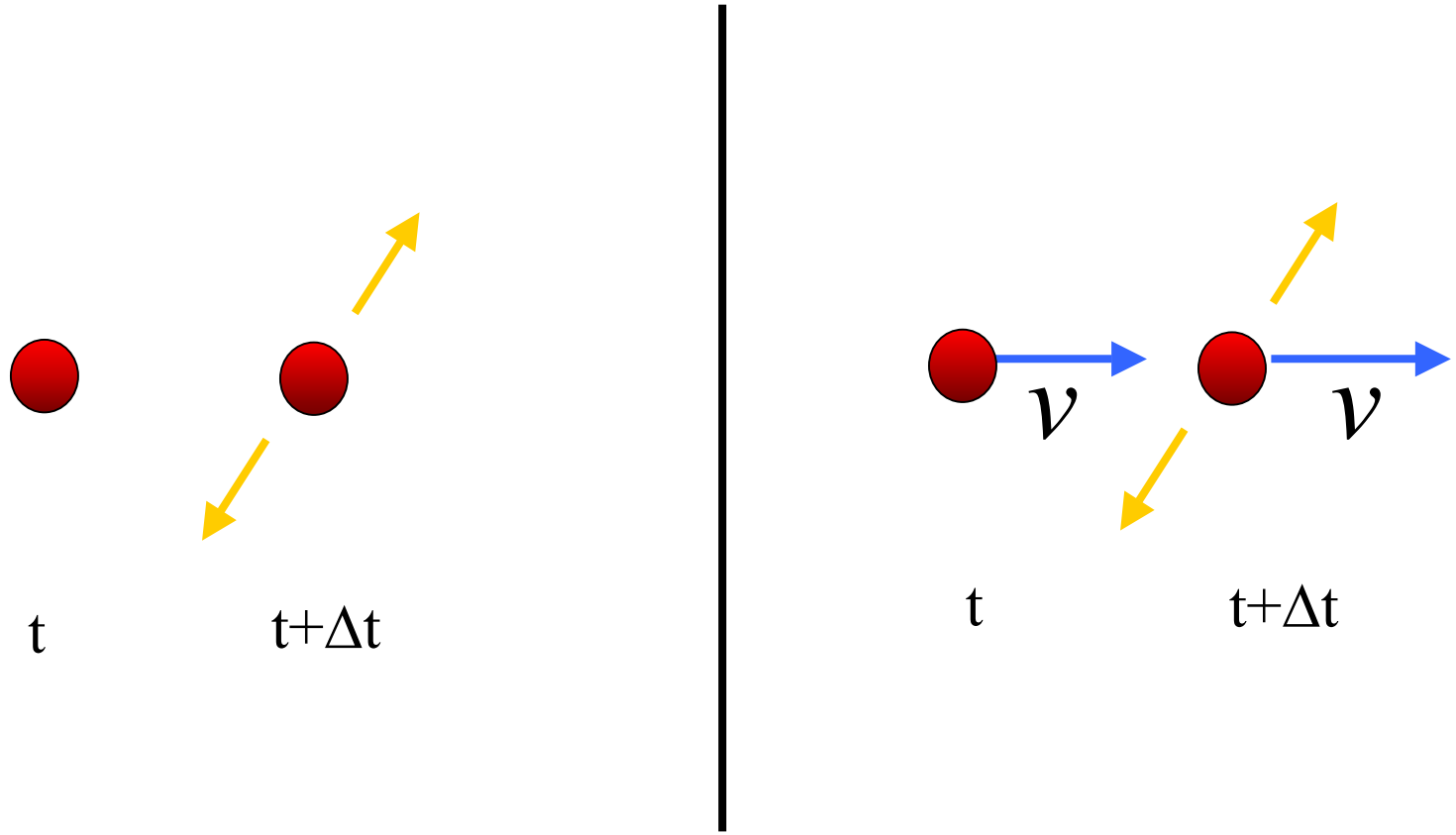
$$(\Delta t')^2 = \frac{(\Delta y)^2}{(c^2 - v^2)}$$

$$\boxed{\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}}$$

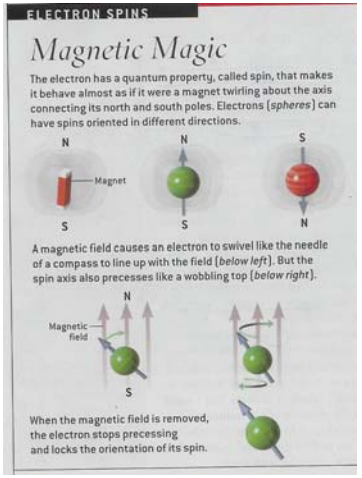
$$(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2 - (c\Delta t')^2 = 0$$

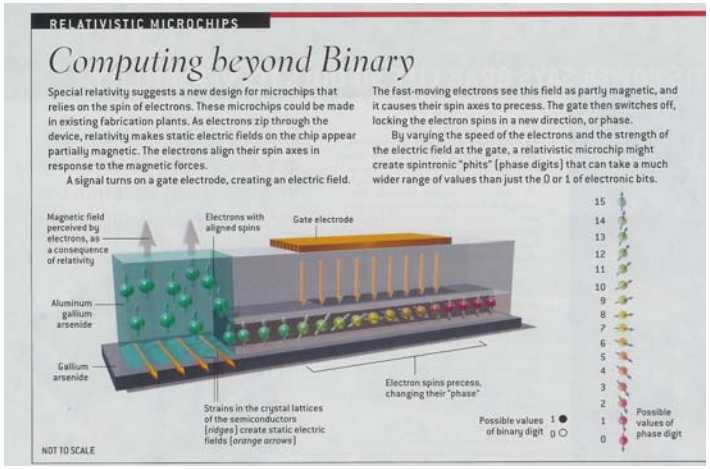
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

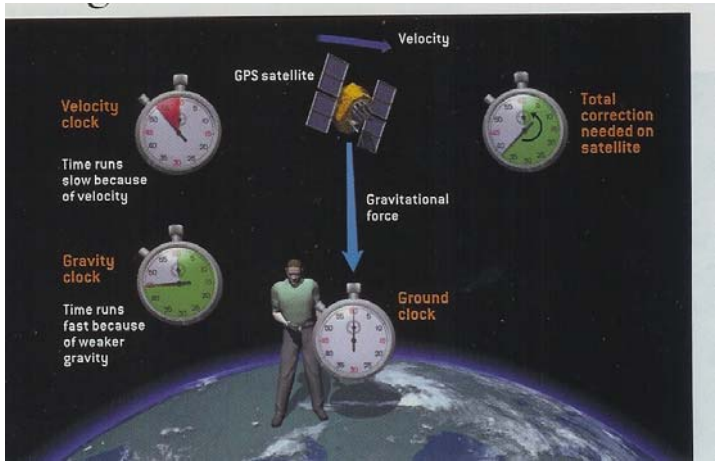
# 27 septembre 1905, $E = mc^2$



# Aujourd'hui, la relativité






(45-7), 38 *µs/jour*

= 11 *km/jour*

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Plan

- Avant, après, aujourd'hui
  - Les quanta
  - Le mouvement Brownien
  - La relativité
  - 1906 Théorie quantique des solides
- Einstein après 1919

- La supraconductivité
- Et à Sherbrooke

# Einstein après 1919

- Célébrité
  - (Lettre à Roosevelt, Président Israël…)
- 1922 Prix Nobel de physique pour l'effet photoélectrique
- 1925 Condensation de Bose-Einstein
- 1935 Paradoxe EPR

- Ses réticences sur l'aspect probabiliste de la mécanique quantique et la dualité onde-particule

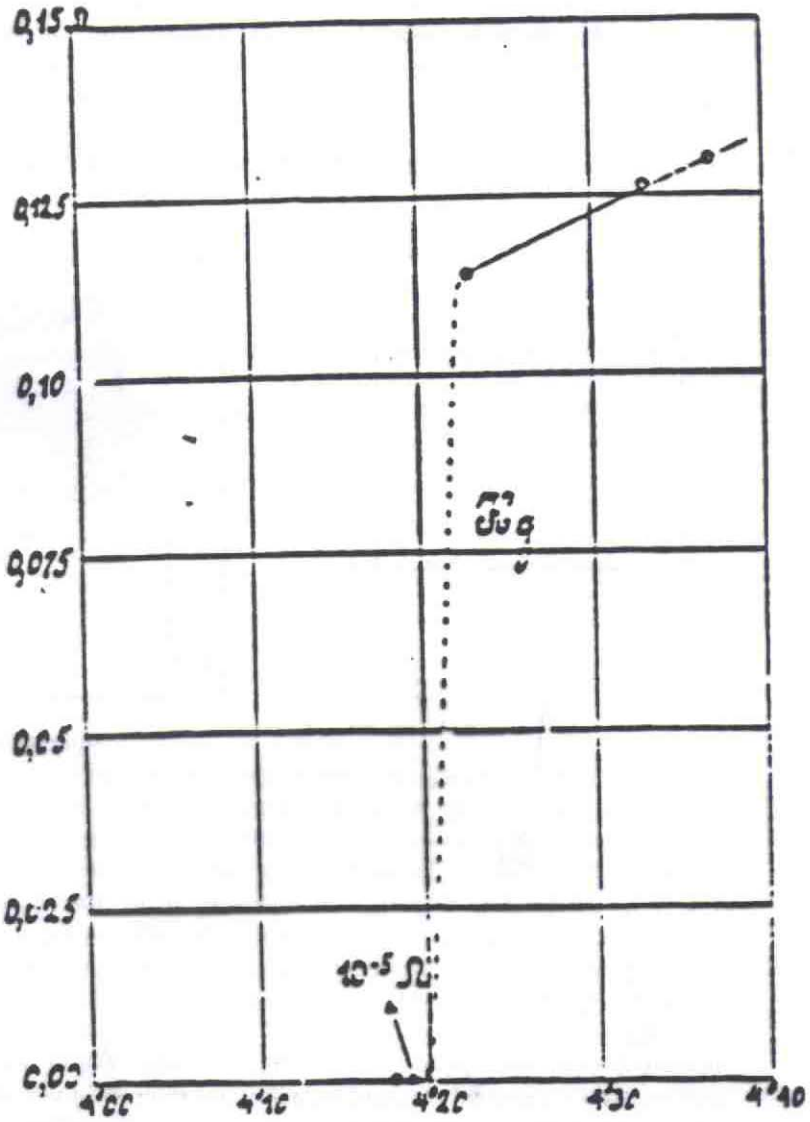
# Plan

- Avant, après, aujourd'hui
  - Les quanta
  - Le mouvement Brownien
  - La relativité
  - 1906 Théorie quantique des solides
- Einstein après 1919

- La supraconductivité
- Et à Sherbrooke

Kamerlingh Onnes 1911

Perfect conductivity



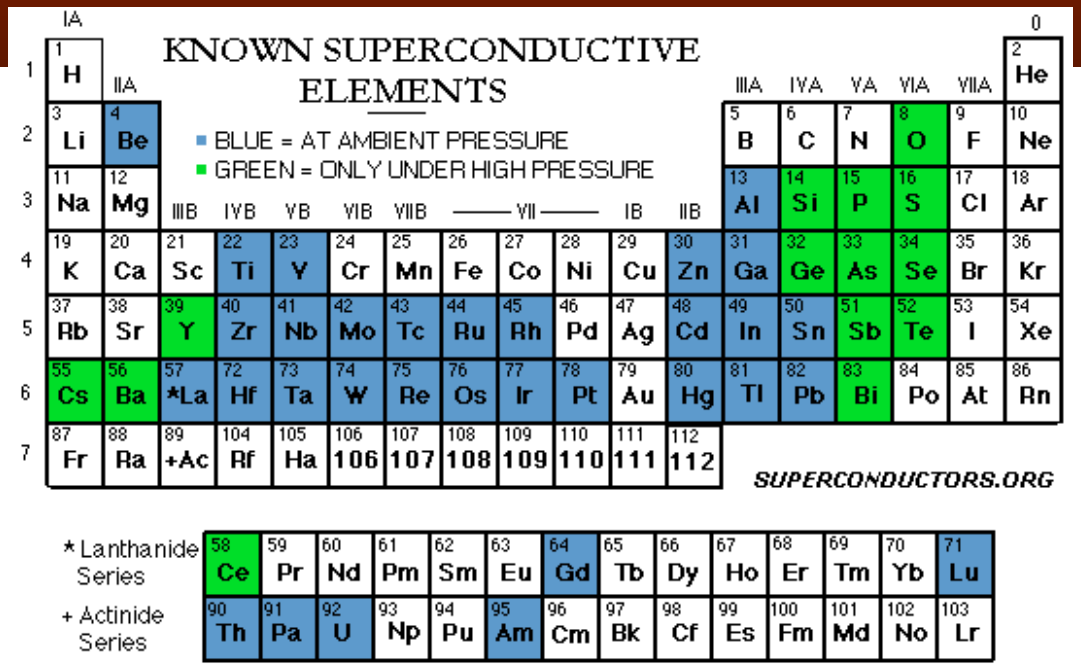

Temperature (°K)

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Histoire :

1911: Hg (utilisé comme thermomètre)

Plusieurs éléments sont supraconducteurs.



# Les supraconducteurs «conventionnels»

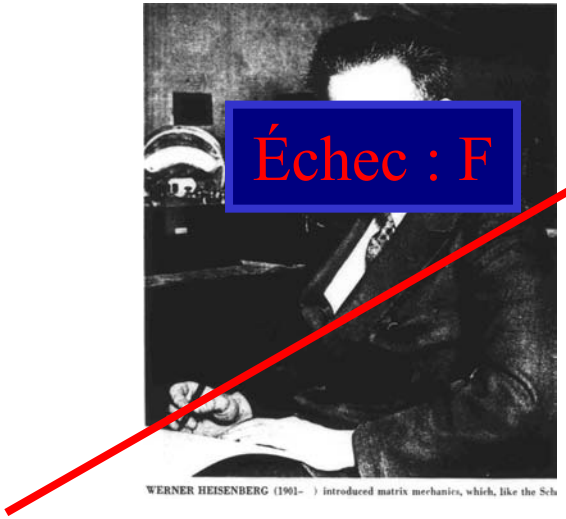
•À la recherche d'une explication: une série d'échecs et un triomphe

- Pendant 46 ans, de 1911 à 1957, la supraconductivité demeure inexpliquée.

- En 1950 c'est devenu le problème le plus important en physique théorique

- Richard Feynman: *"Il n'y a personne d'assez brillant pour l'expliquer"*

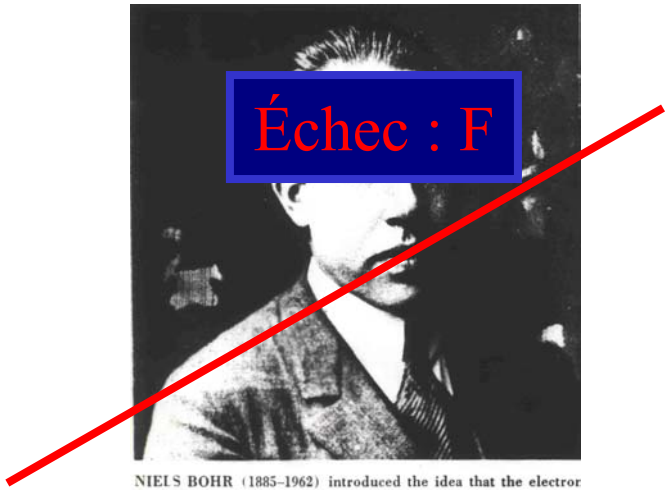
Feynman




WERNER HEISENBERG (1901– ) introduced matrix mechanics, which, like the Sch

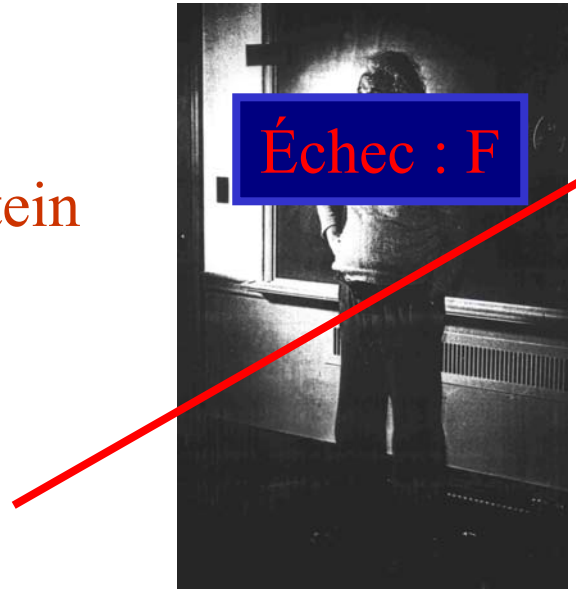
Heisenberg

Bohr




NIELS BOHR (1885–1962) introduced the idea that the electron moved about the nucleus in well-defined orbits. This photograph was made in 1922, nine years after the publication of his paper

Einstein



# Les supraconducteurs «conventionnels»

- La théorie BCS (1957)

***Comportement quantique à l'échelle macroscopique***

Leon Cooper

John Bardeen*

Robert Schrieffer

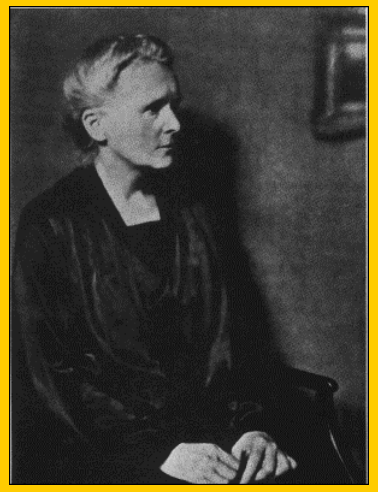
**Prix Nobel : 1972**

•John Bardeen :

•La seule personne à recevoir 2 prix Nobel en physique !!!

**Invention : TRANSISTOR!**

W. Shockley, J. Bardeen, W.H. Brattain

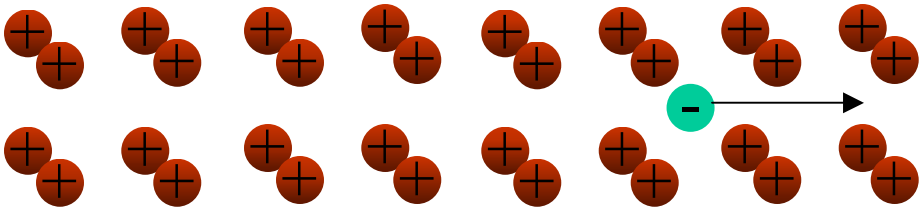


**Marie Curie:**

1903 Physique avec H.A. Becquerel

1911 Chimie (seule)

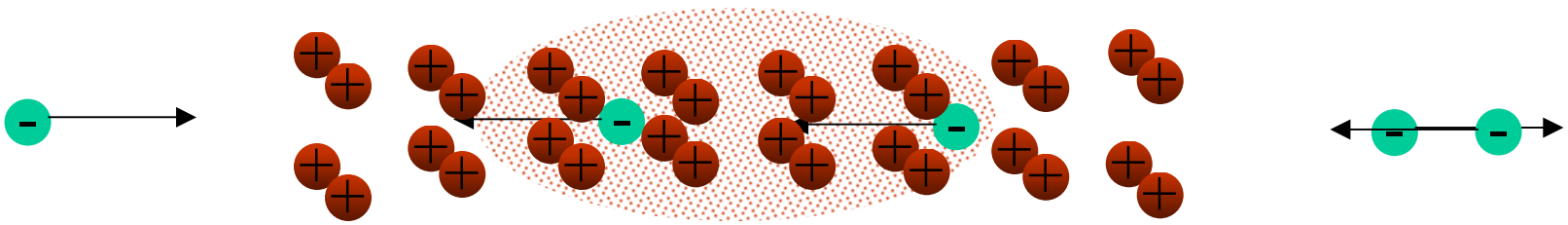
# Résistance dans un métal normal



# Ingrédient #1

# Attraction et formation de Paires de Cooper

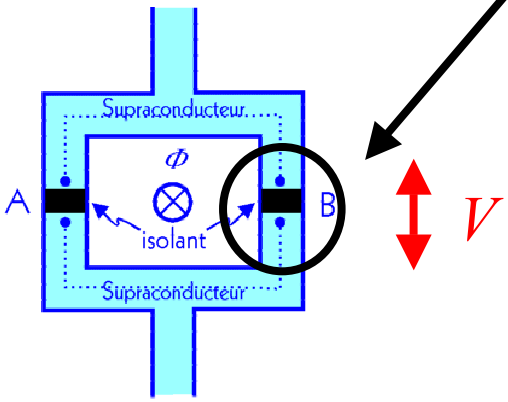
# Paires de Cooper
# ou
# Prélude à la supraconductivité



# Ingrédient #2
# Cohérence

Les paires de Cooper forment des "bosons" qui "condensent" tous dans le même état quantique. Leurs fonctions d'onde ont toutes la même phase quantique. Les $10^{22}$ électrons sont dans un seul état cohérent (C'est comme un gros atome!).
(Parent de la condensation de Bose-Einstein 1925)

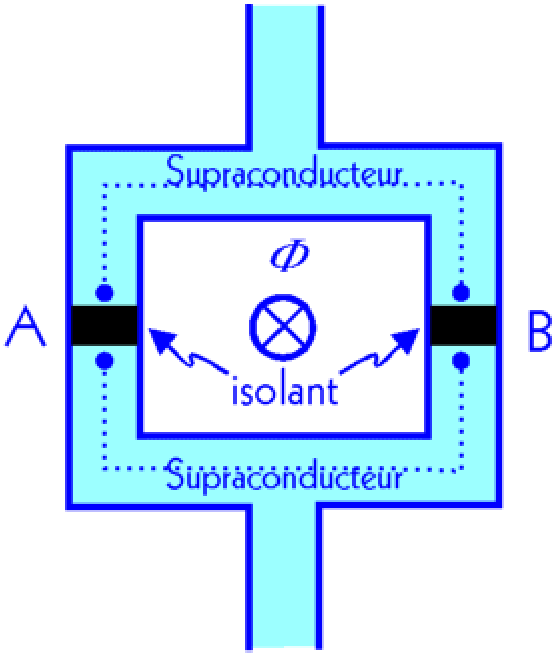
**Exemple spectaculaire d'application de la cohérence:**
**Effet Josephson**

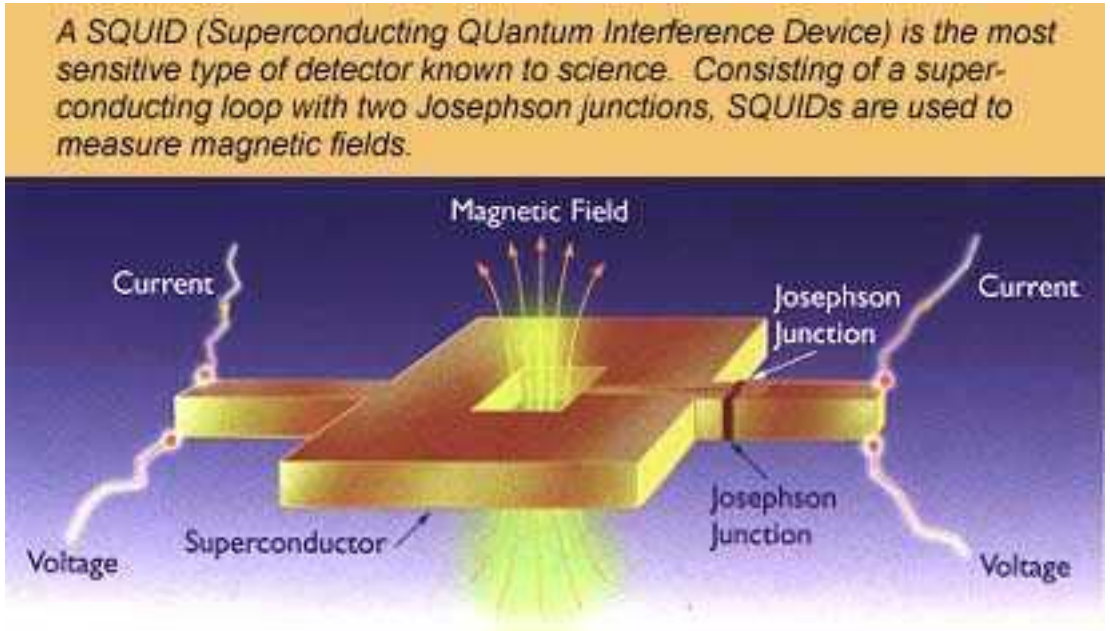



$$I = I_0 \sin(2\pi\phi)$$
$$d\phi / dt = 2eV / h$$

N.B. - Le facteur 2
- Devenu l'étalon pour le Volt

# Détection de champs magnétiques faibles



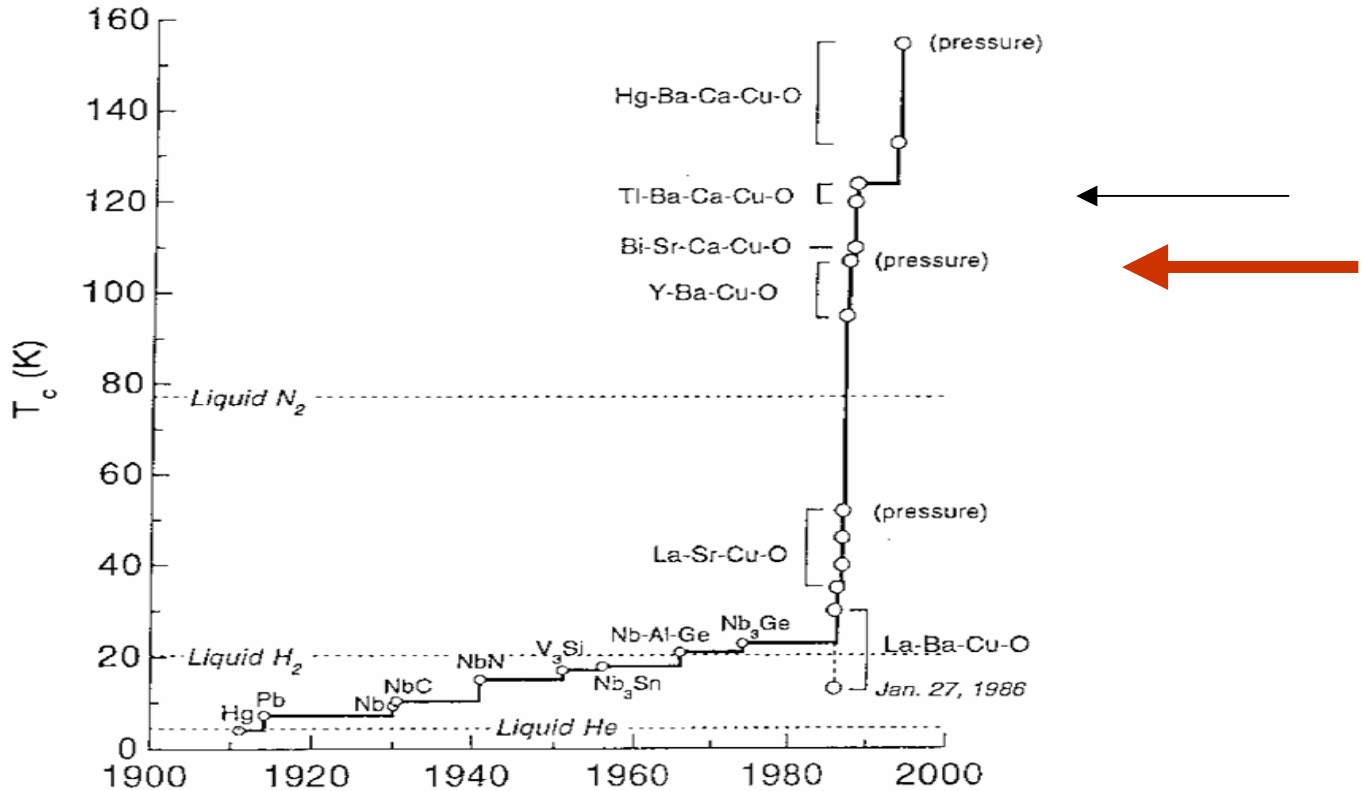

**SQUID "Superconducting Quantum Interference Device"**

Un champ magnétique modifie la phase des ondes de matière. En détectant les oscillations dans le courant, on peut détecter des champs magnétiques très faibles.

1987 : $YBa_2Cu_3O_7$ 93K

--- $LN_2$ = 77K ---

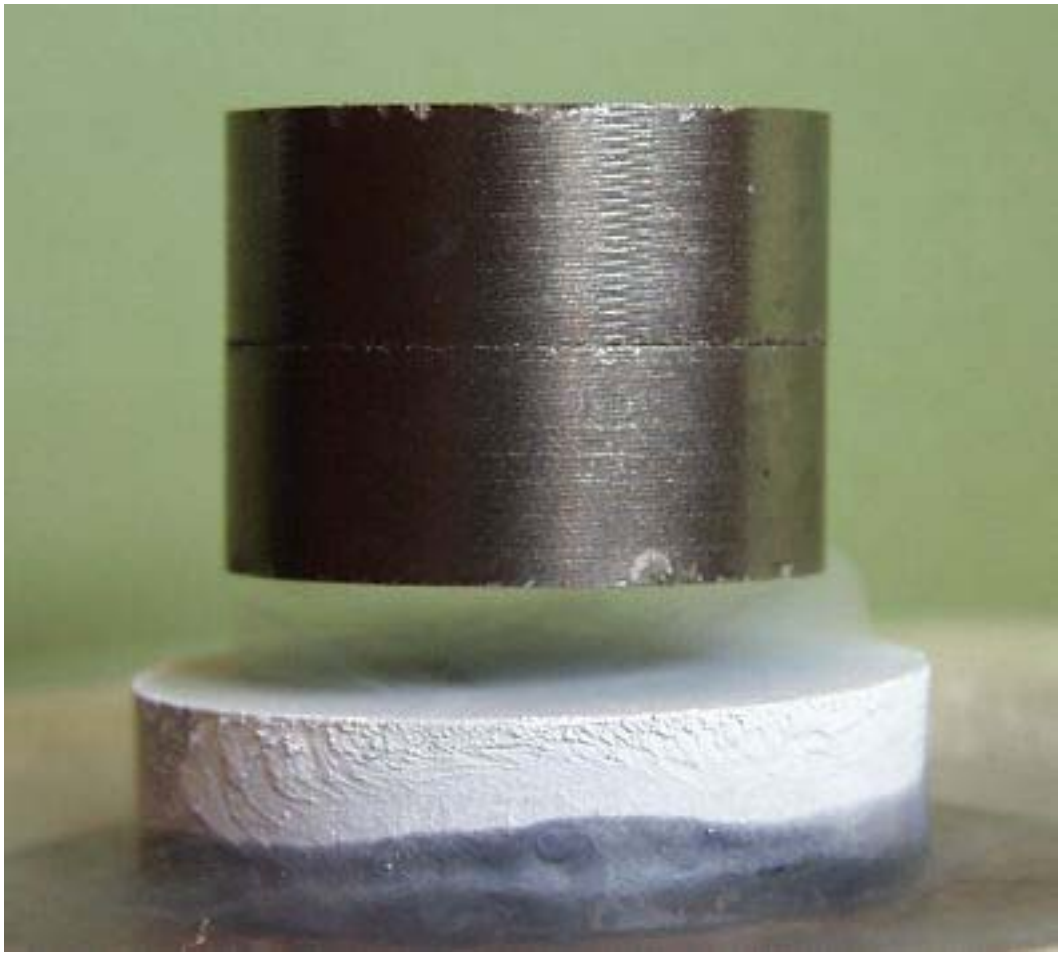
Paul Chu : U. of Houston



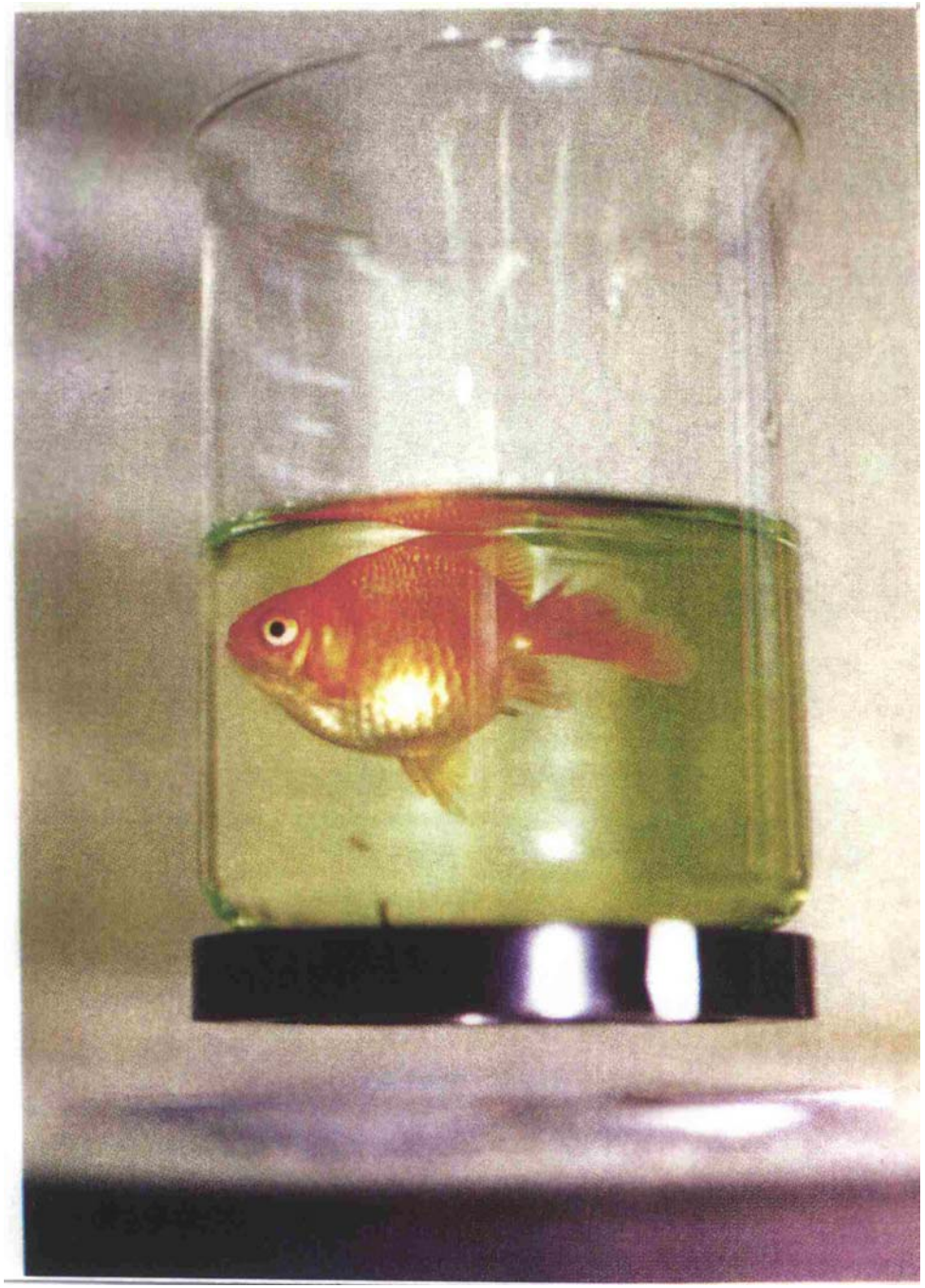
$\chi = -1$

Écrantage parfait

(l'effet Meissner)



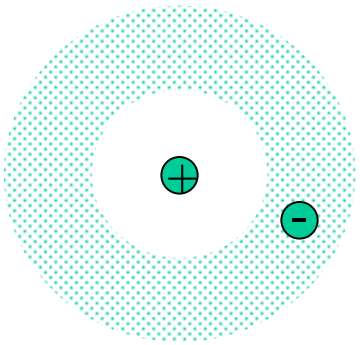
Aucun mal n’a
été fait
aux animaux
durant cette
expérience



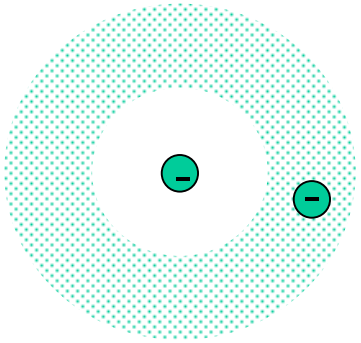
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

En cas d'échec le physicien aurait pu se faire faire du mal

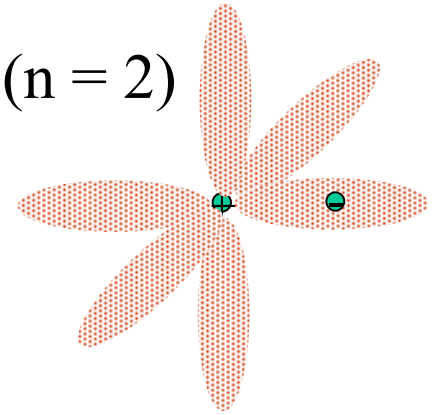
# Comprendre le mécanisme. Où en sommes-nous?

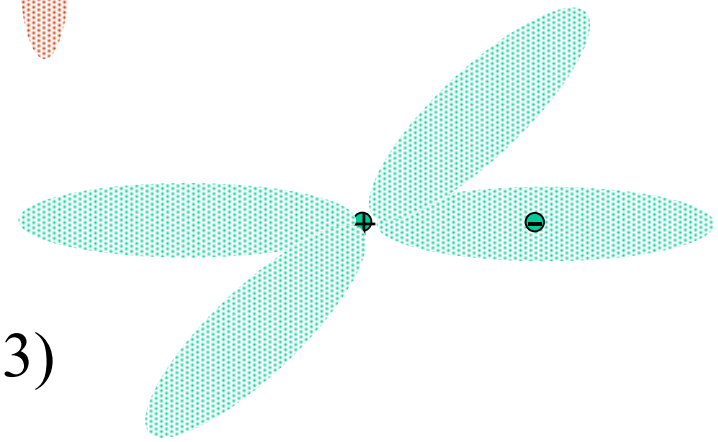


Type *s* (n = 1)



Type *p* (n = 2)

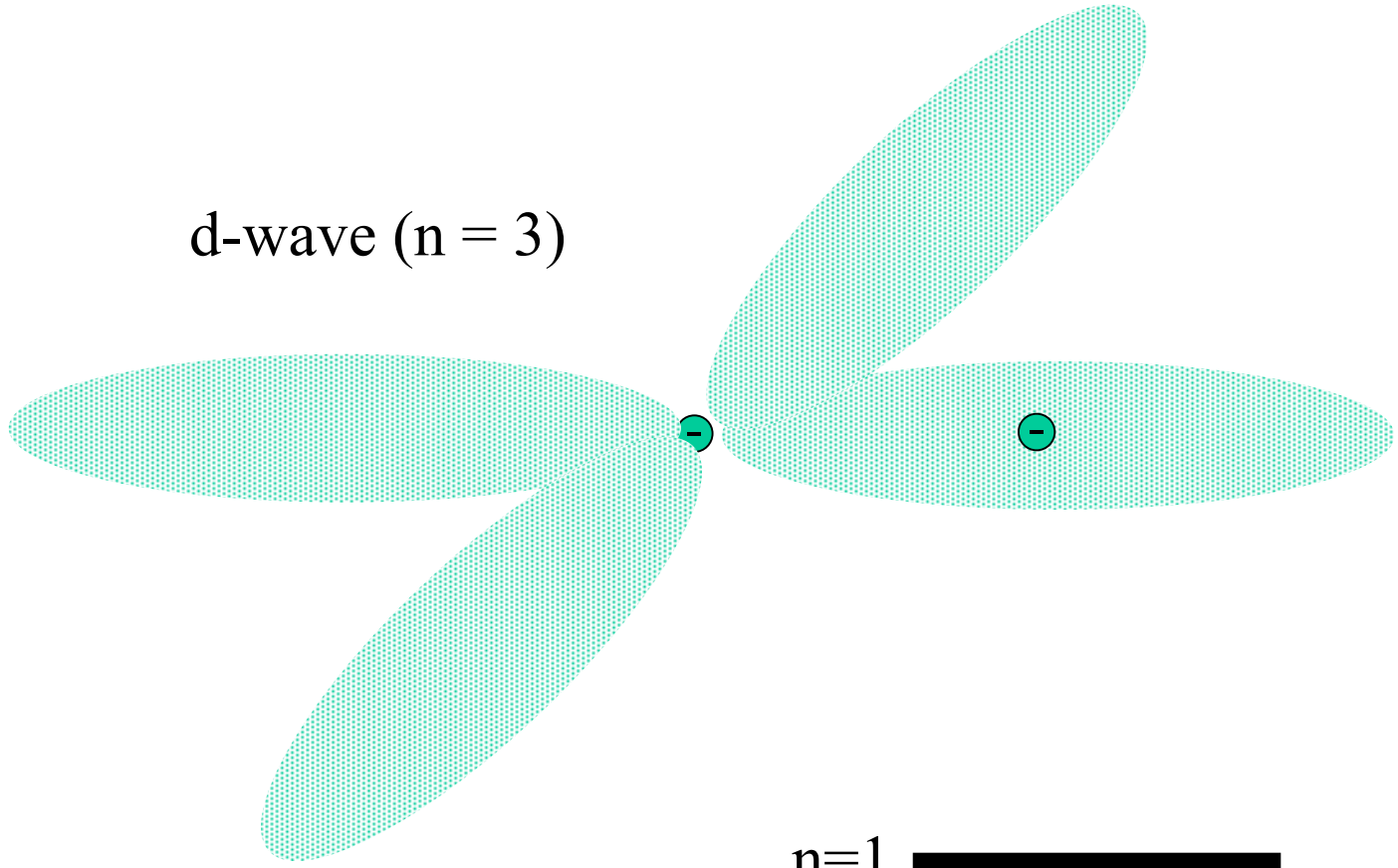


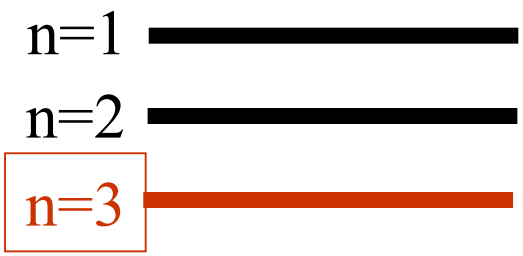


Type *d* (n = 3)

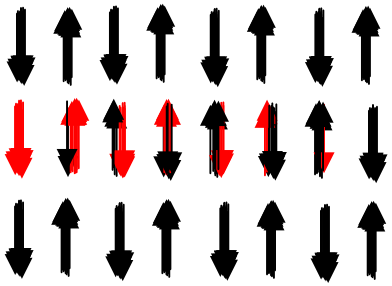
# Comprendre le mécanisme. Où en sommes-nous?

d-wave (n = 3)



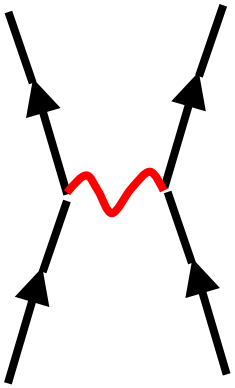


# «Mécanisme magnétique»?

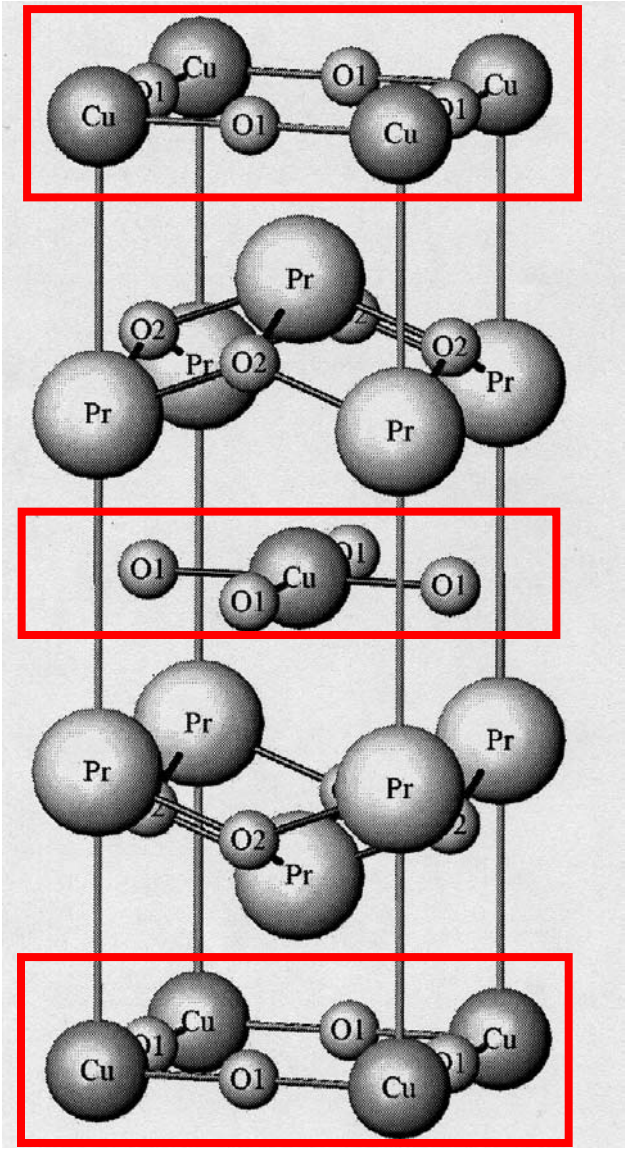


t = T

t = 0



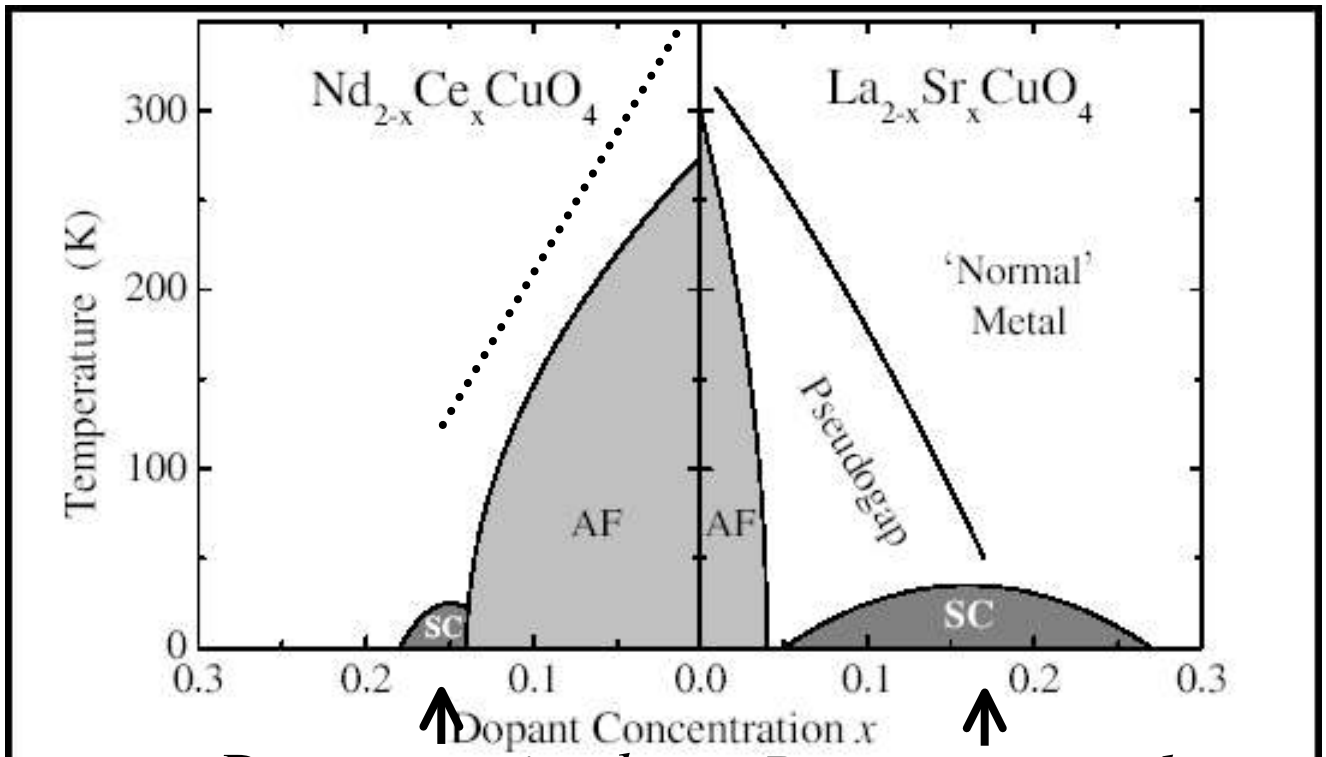
# Plans de $CuO_2$



$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

# Diagramme de phase

Dopé électrons ← → Dopé trous




*Dopage optimal* *Dopage optimal*

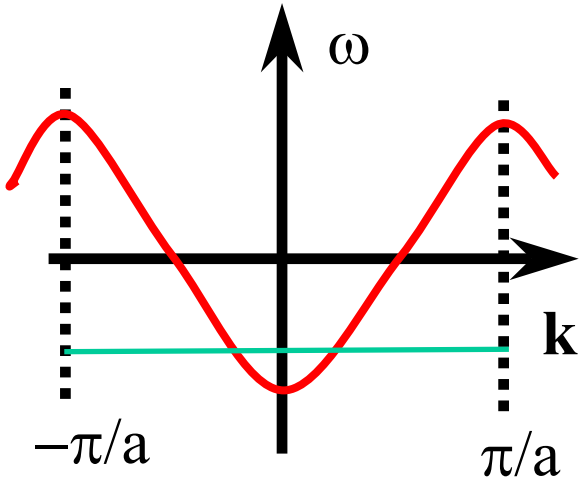
FIG. 1 Phase diagram of n and p-type superconductors.

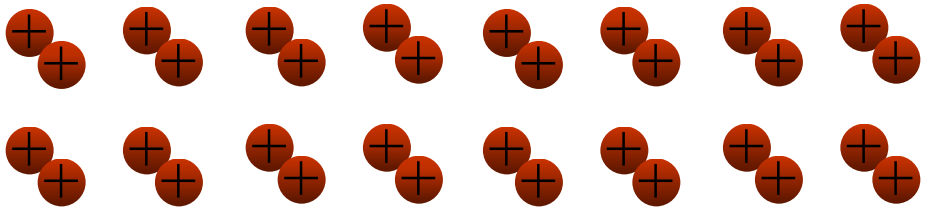
← *n*, densité électronique

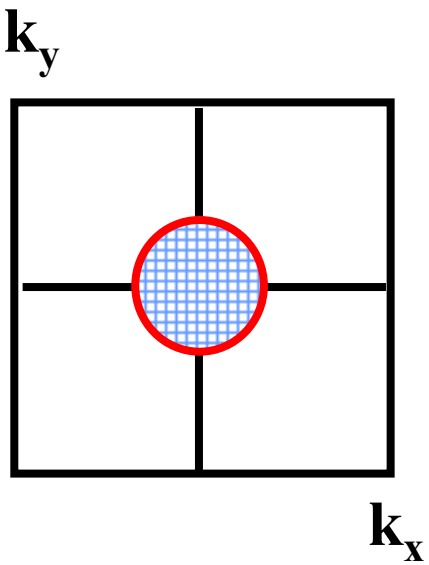
Damascelli, Shen, Hussain, RMP 75, 473 (2003)

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

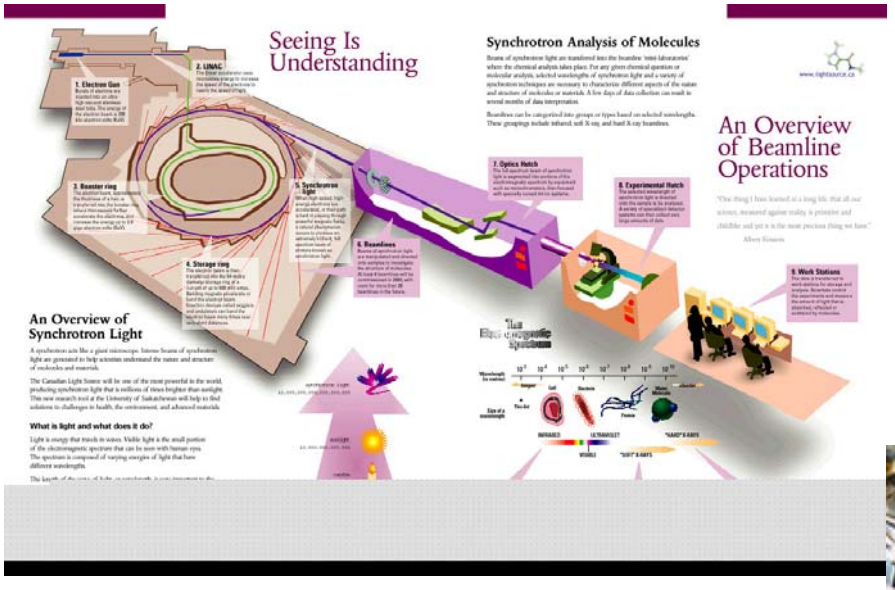
# Théorie quantique des solides : (cas des electrons sans interactions)





# Synchrotron, source de photons



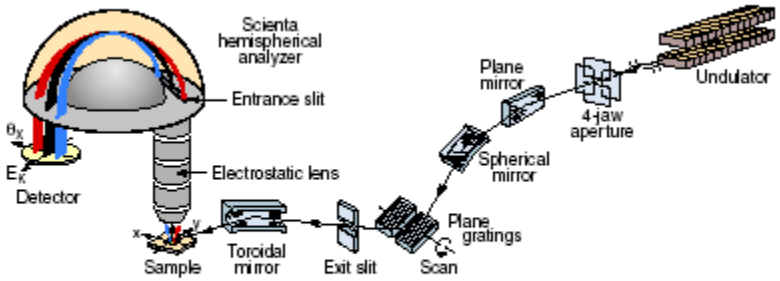
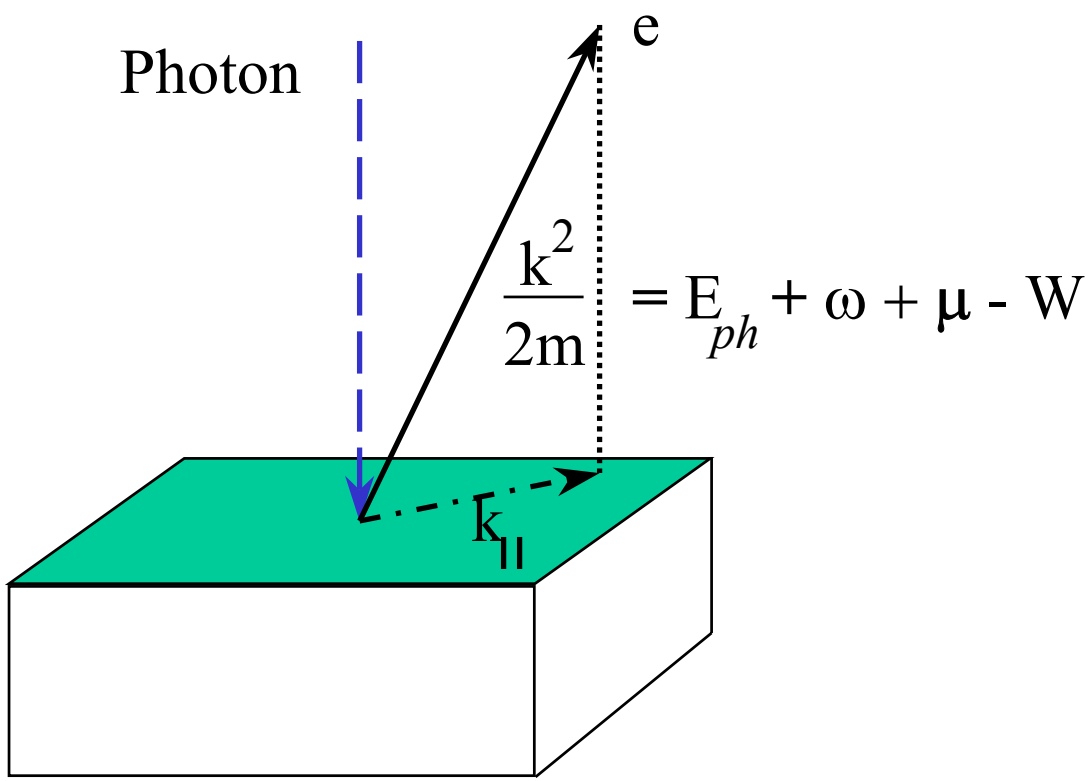




FIG. 6 Generic beamline equipped with a plane grating monochromator and a Scienta spectrometer [Color].

Damascelli, Shen, Hussain, 2002.

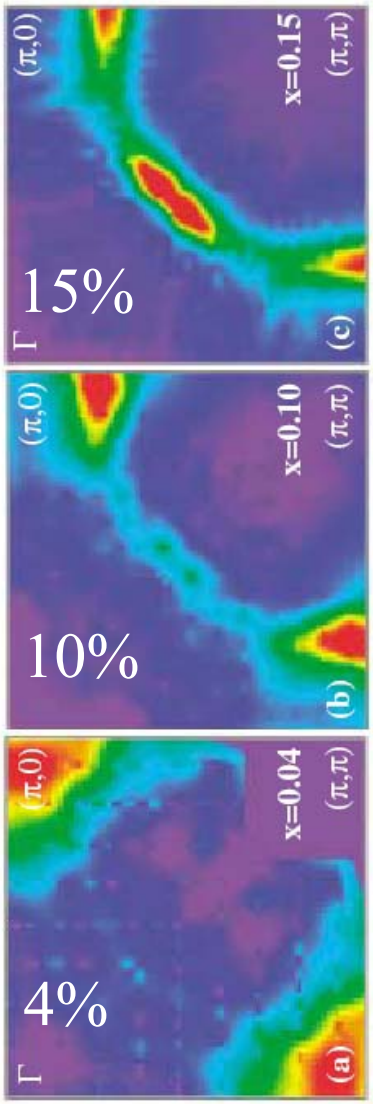
# États des électrons en $d=2$

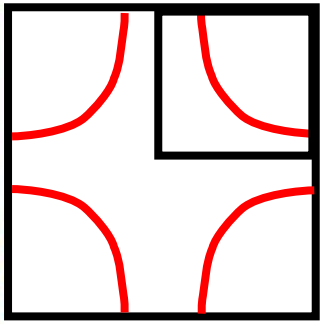



Angle Resolved Photoemission Spectroscopy (ARPES)

# Surface de Fermi, dopé aux électrons

Armitage *et al.* PRL **87**, 147003; **88**, 257001



# Plan

- Avant, après, aujourd'hui
  - Les quanta
  - Le mouvement Brownien
  - La relativité
  - 1906 Théorie quantique des solides
- Einstein après 1919

- La supraconductivité
- Et à Sherbrooke

Steve Allen

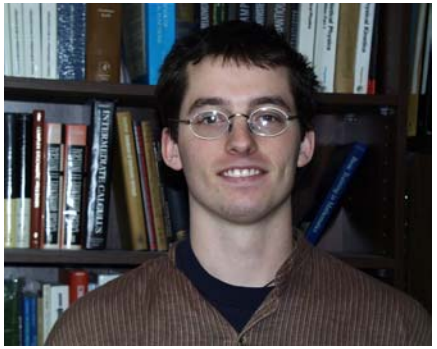
Liang Chen

Yury Vilk

François Lemay

Samuel Moukouri

David Poulin



Hugo Touchette

J.-S. Landry

M. Boissonnault

K. LeHur

C. Bourbonnais

R. Côté

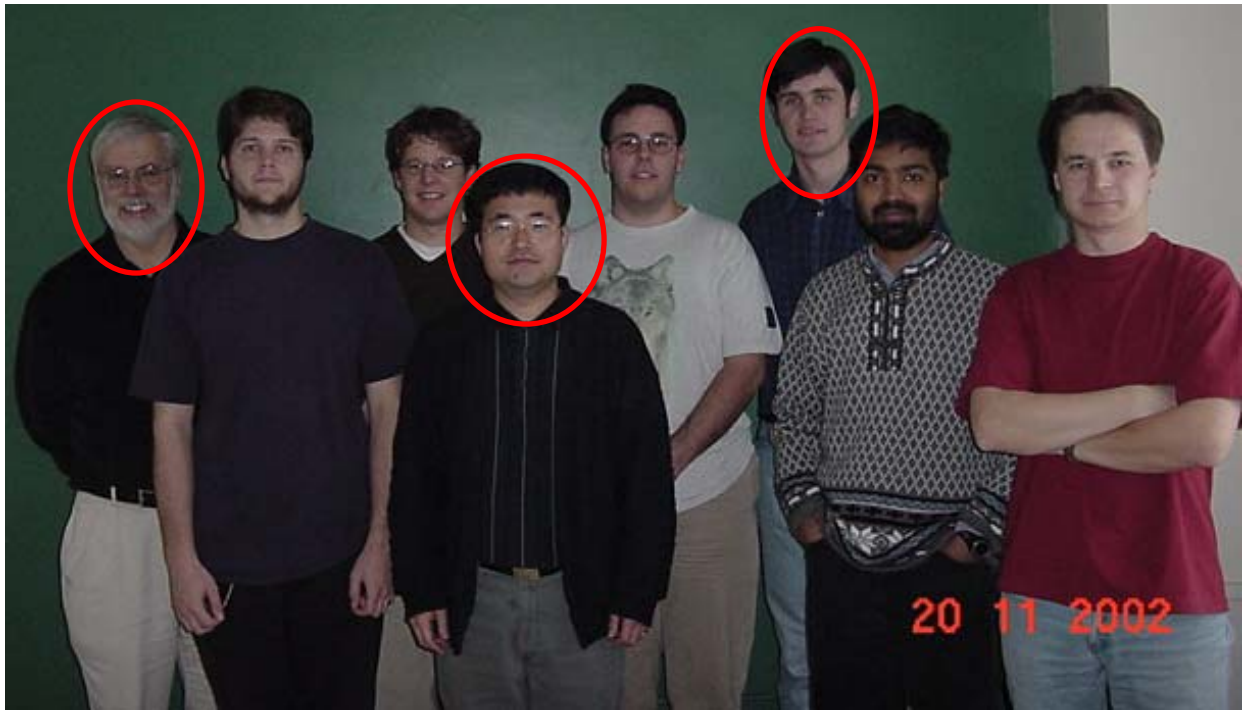
D. Sénéchal

Alexis Gagné-Lebrun

A-M.T.

Alexandre Blais

Vasyl Hankevych




Sébastien Roy

Sarma Kancharla

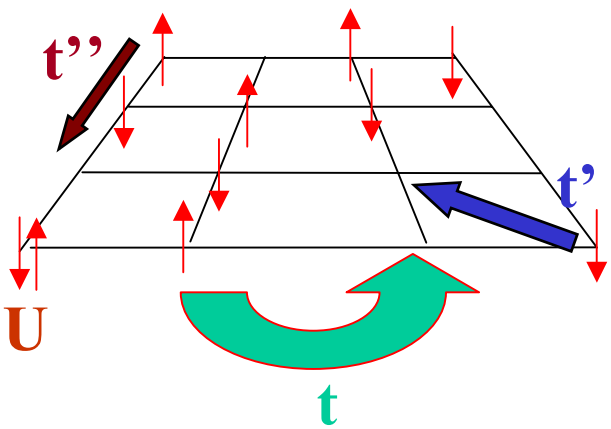
Bumsoo Kyung

Maxim Mar'enko

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Le modèle théorique (Hubbard)

$$H = -\sum_{<ij>\sigma} t_{i,j}\left(c^{\dagger}_{i\sigma}c_{j\sigma} + c^{\dagger}_{j\sigma}c_{i\sigma}\right) + U\sum_{i} n_{i\uparrow}n_{i\downarrow}$$




fixed

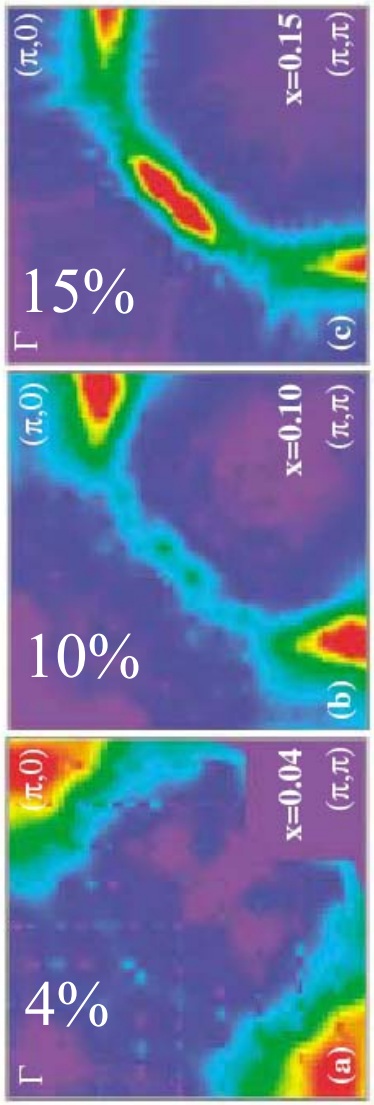
*t'=-0.175t, t''=0.05t*
*t=350 meV, T=200 K*

Couplage faible $U<8t$

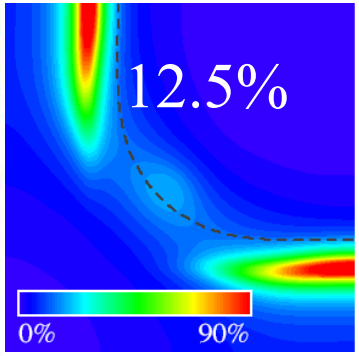
$n=1+x$ – concentration d'électrons

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Dopés électrons, 12.8%, $U=8t$

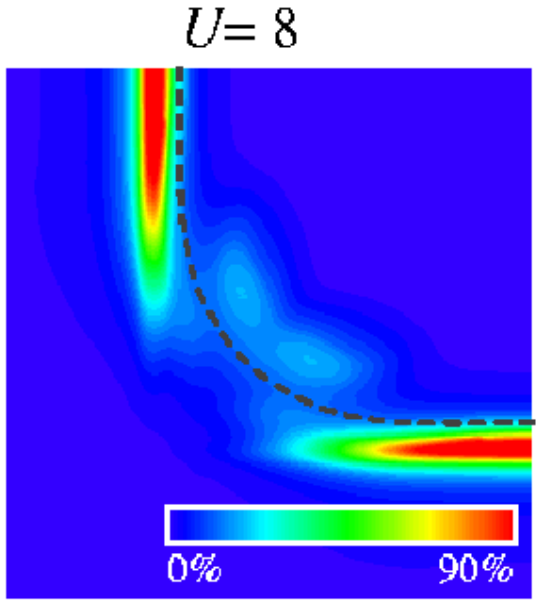


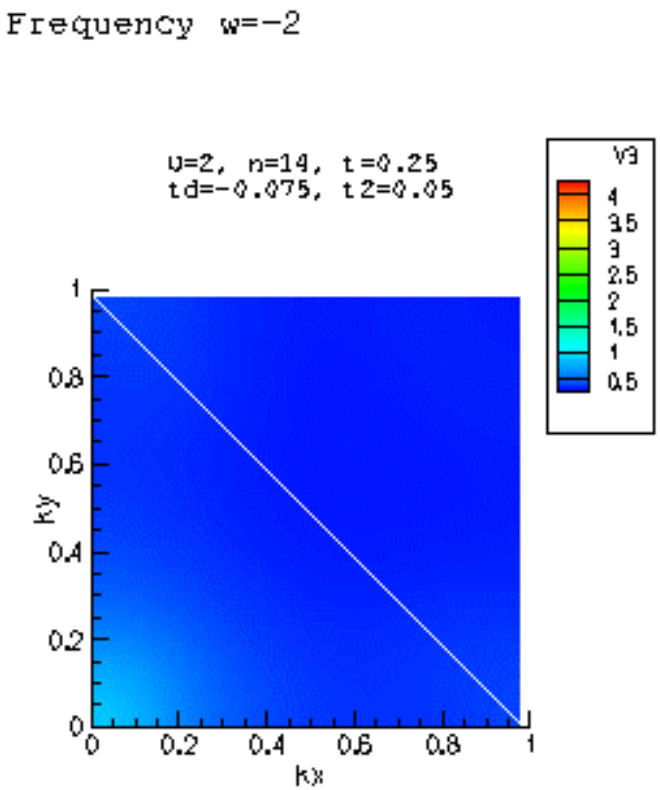

*4x4*

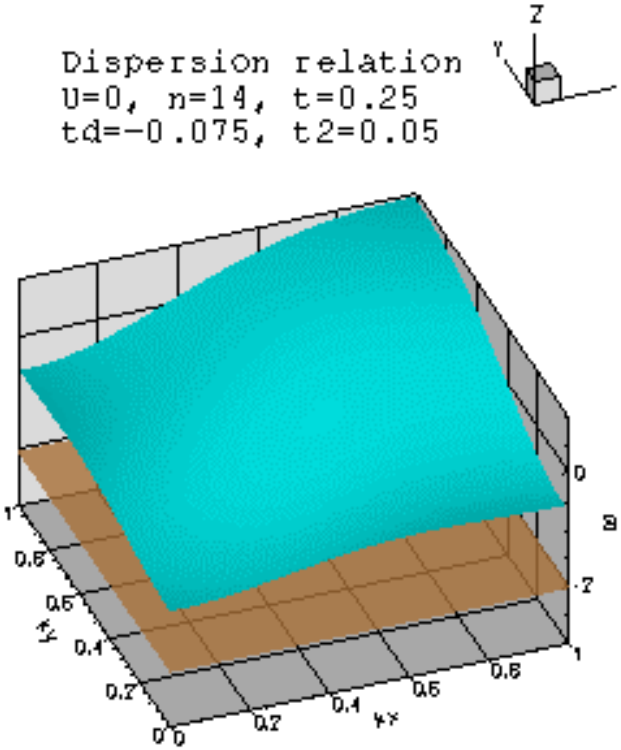



V. Hankevych, B. Kyung, A.-M. Daré,
D. Sénéchal, A.-M.S.T., cond-mat/0407085

# Calculs théoriques, dopés électrons 17%, $U = 8t$



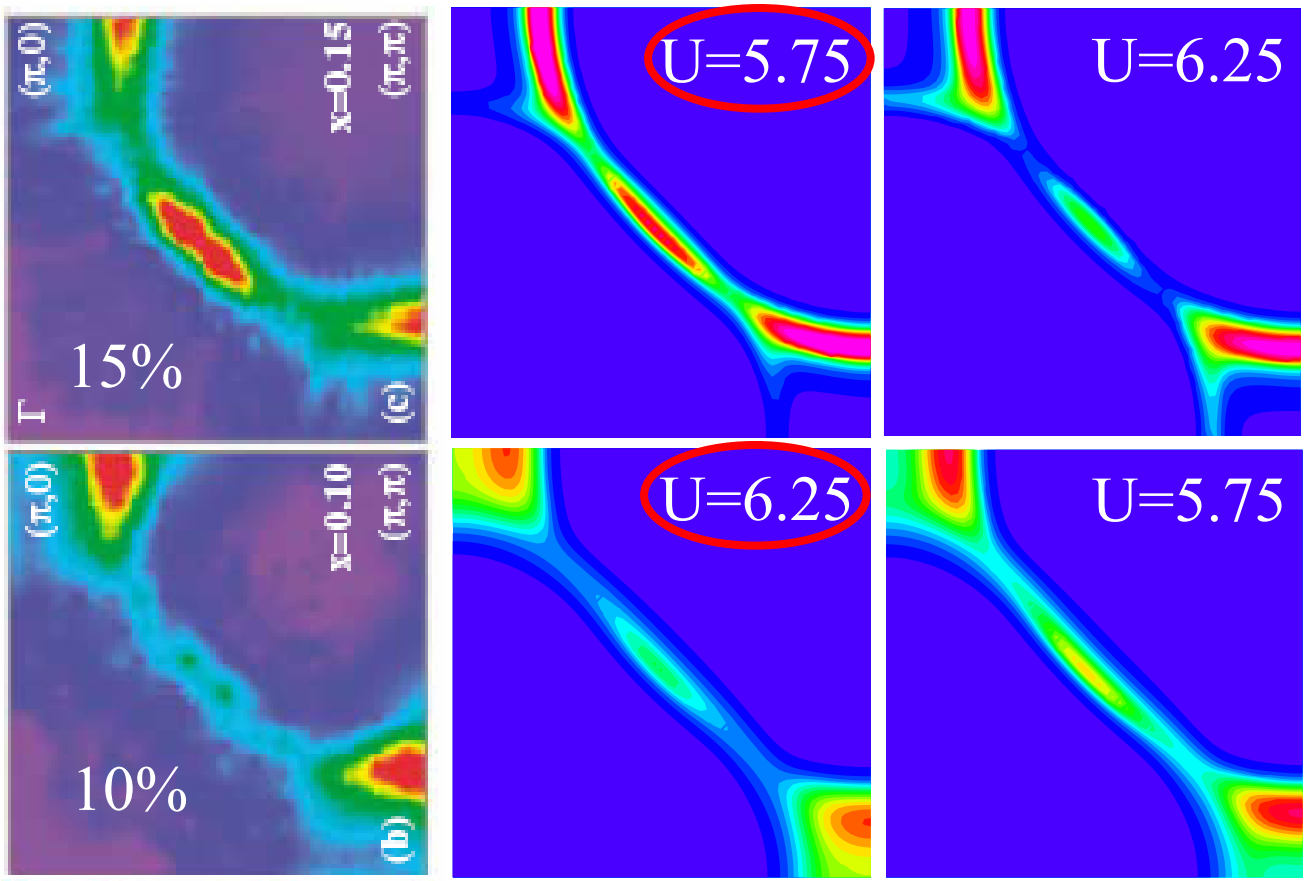




D. Sénéchal, A.-M.S.T., PRL, mars 2004

# Théorie *vs* expérience encore

Hubbard repulsion *U* has to…




be not too large

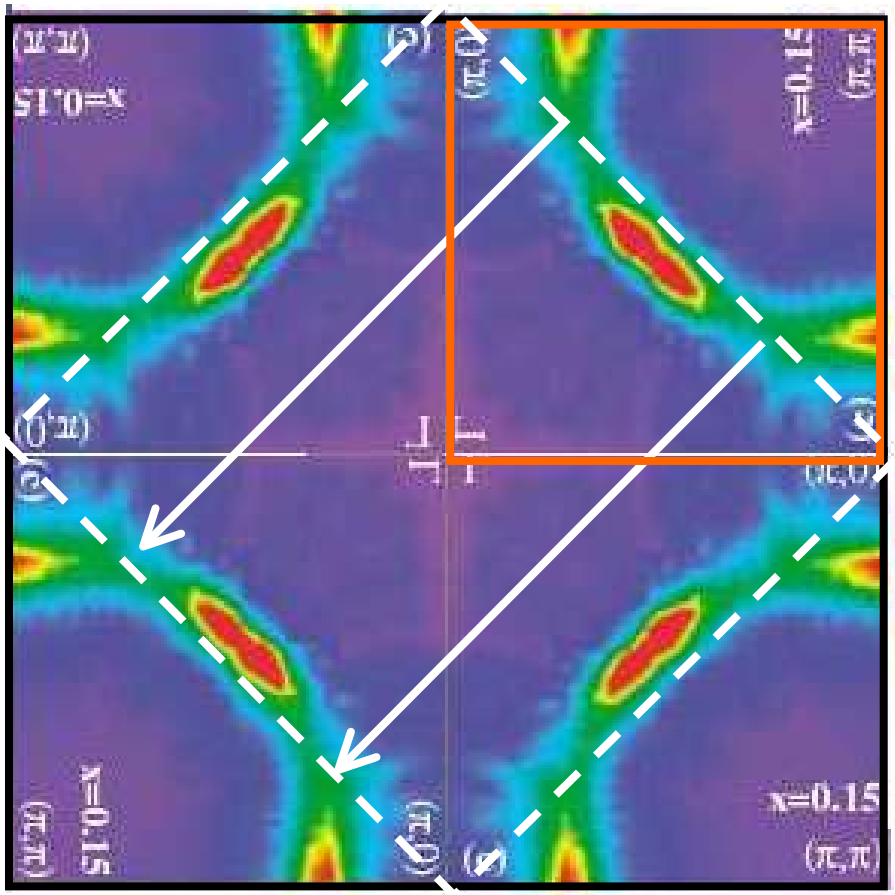
increase for smaller doping

B.Kyung *et al.*,PRB **68**, 174502 (2003)

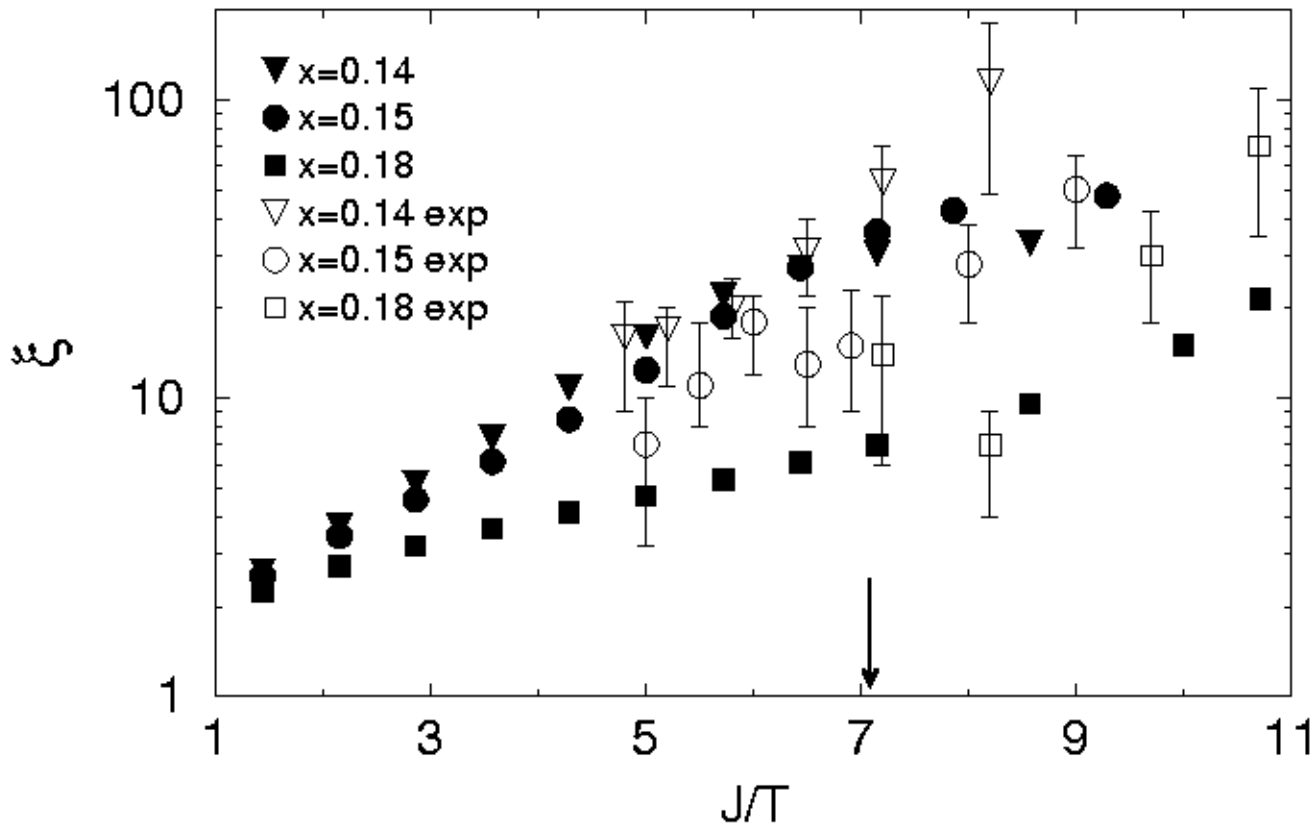
Hankevych, Kyung, A.-M.S.T., PRL, sept. 2004

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Points chauds viennent de fluctuations AFM

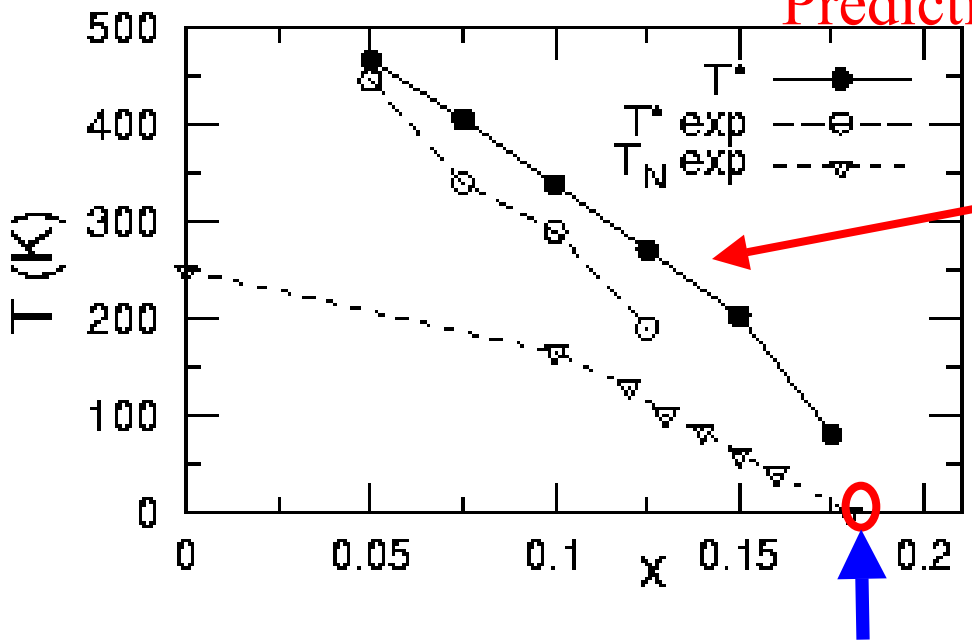


# Longueur de corrélation AFM




Hankevych, Kyung, A.-M.S.T., PRL, sept. 2004
Expt: P. K. Mang et al., cond-mat/0307093, Matsuda (1992).

# Une prédiction vérifiée




Prédiction

➢ $\xi \approx \xi_{th}$ à T pseudogap = $T^*$, et $\xi > \xi_{th}$ pour $T < T^*$

Prédiction

étaye les fluctuations AFM comme origine du PG

Matsui *et al.* cond-mat/0410388
Vérifié T* à $x=0.13$ avec ARPES

Prédiction PCQ
Peut être masqué par transitions 3D

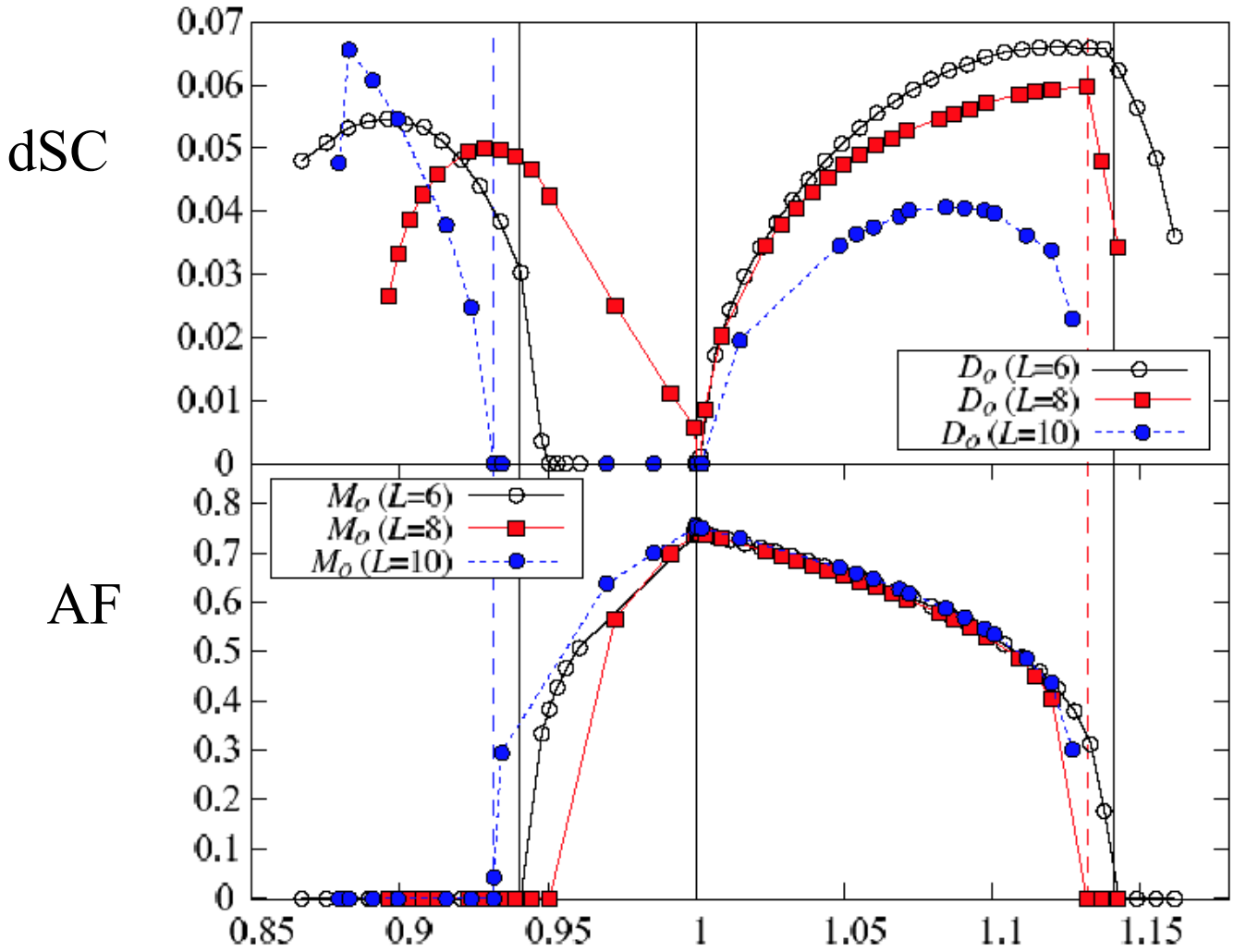
➢ $\Delta_{PG} \approx 10 k_B T^*$ comparable avec les mesures optiques

Hankevych, Kyung, A.-M.S.T., PRL, sept. 2004

Expt: Y. Onose et al., PRL (2001).

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Calculs théoriques, $U = 8t$, différentes tailles




D. Sénéchal, A.-M.S.T., cond-mat/0410162

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

# Conclusion

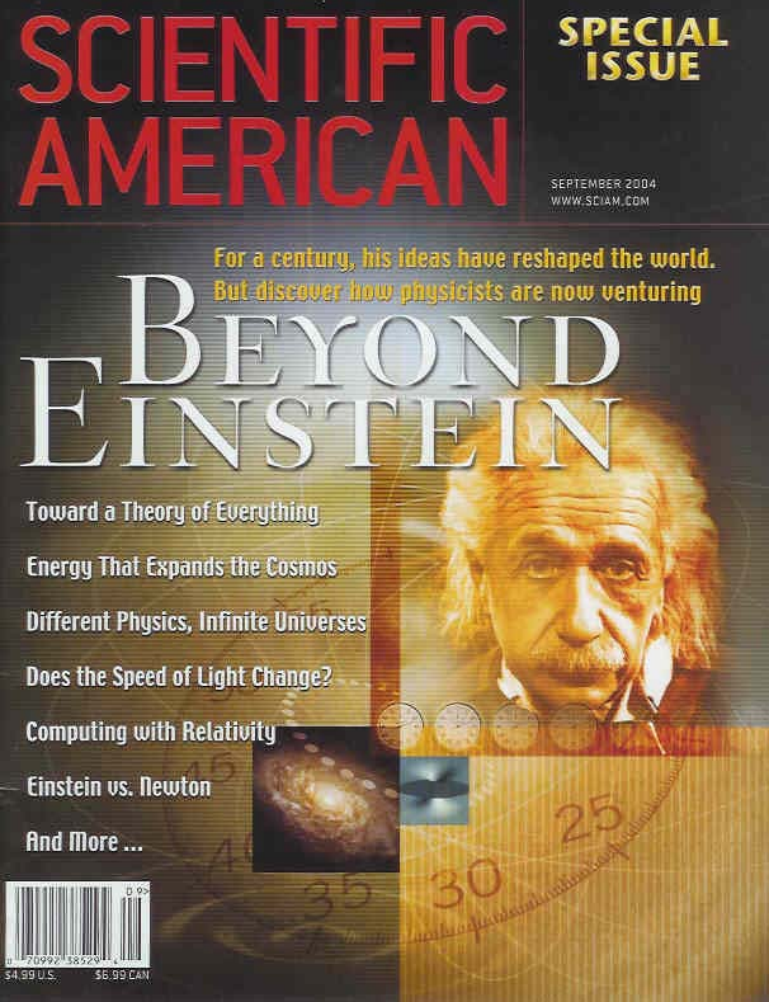
- Einstein et les brevets
- Einstein, le formalisme et la phénoménologie

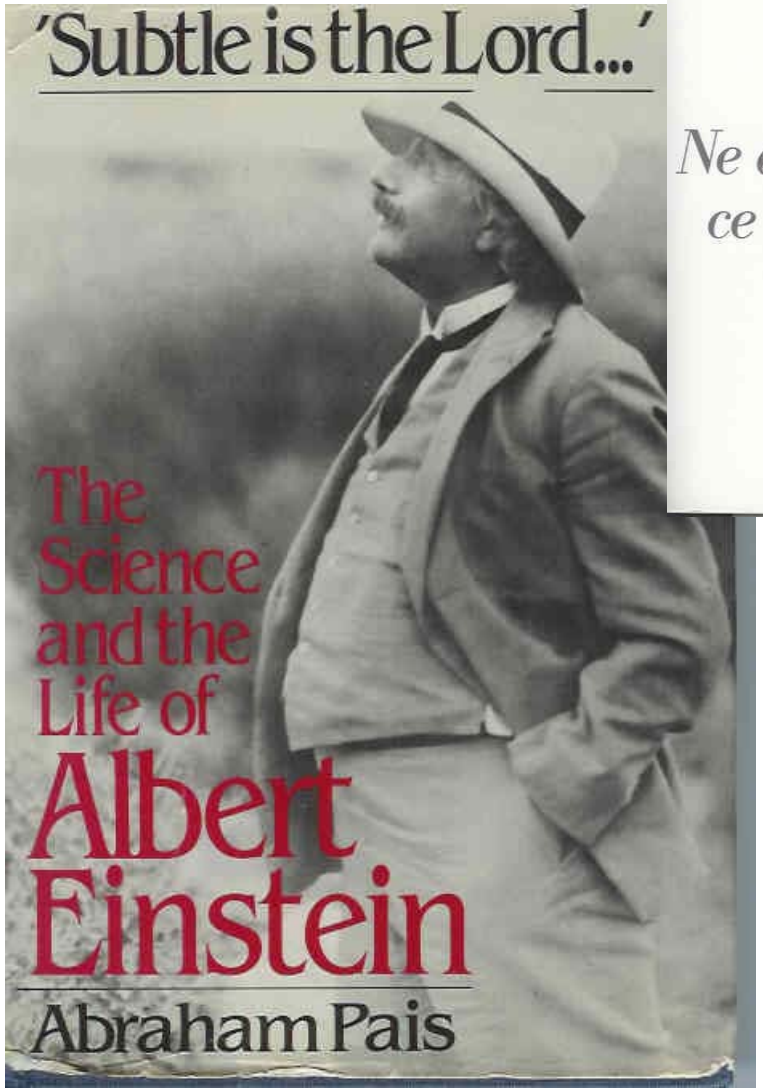
- Les petits effets

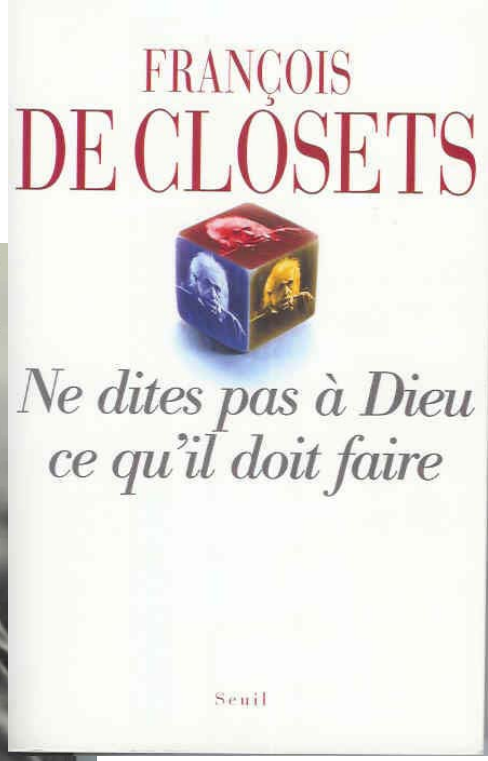
- Philosophique
- Les technologies révolutionnaires

*C'est fini...*

*enfin*

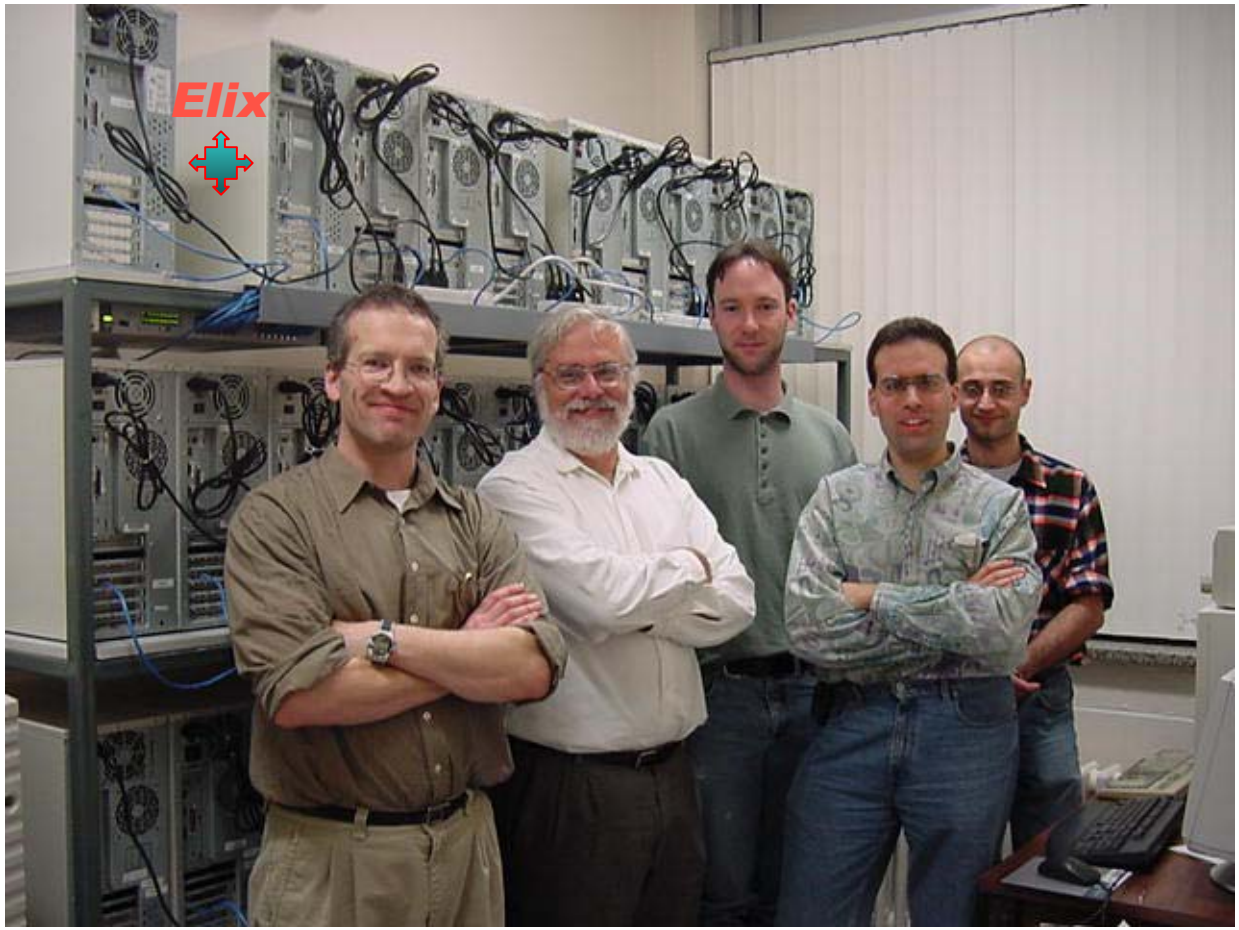


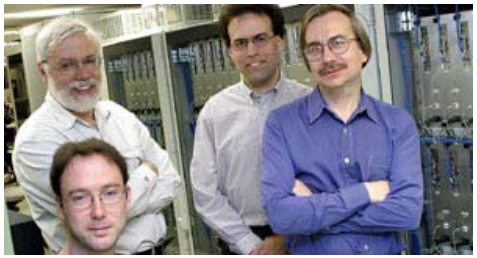

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

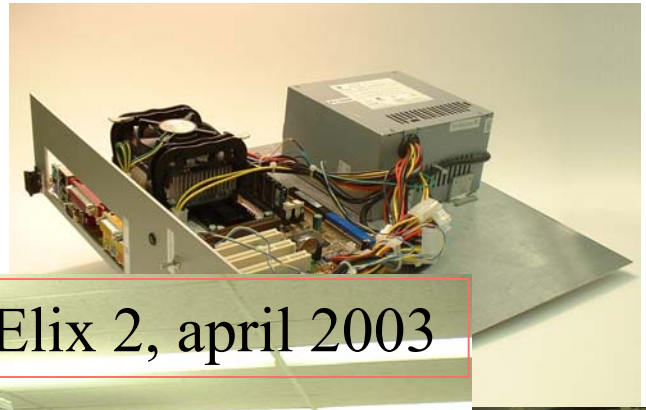
Michel Barrette Mehdi Bozzo-Rey




David Sénéchal A.-M.T. Alain Veilleux

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE





Un noeud d'Elix2

# Elix 2, april 2003

Elix2 vu de profil

Carol Gauthier, analyste en Calcul du CCS en plein machinage d'un noeud d'Elix2

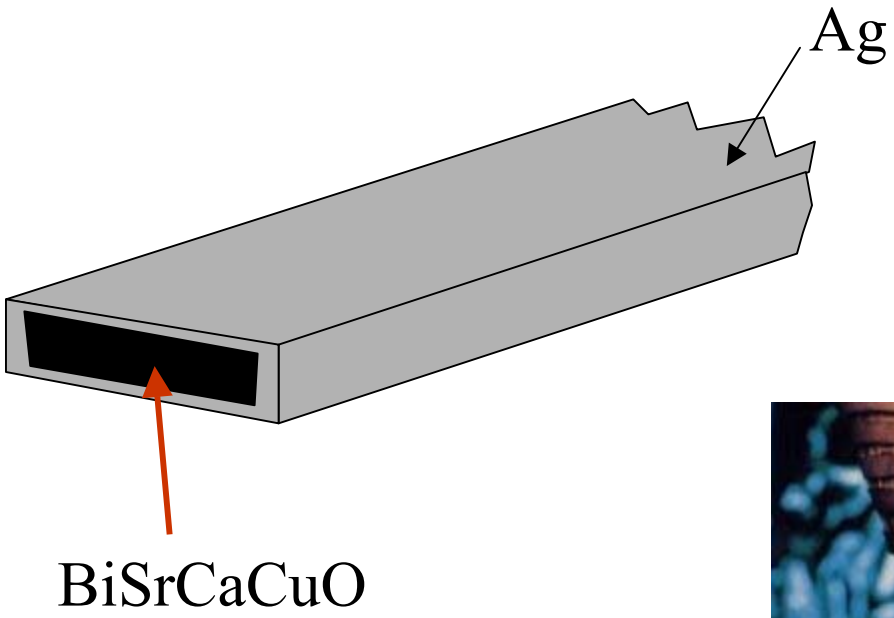
Equipe du CCS devant Elix2. Al'arrière: Patrick Vachon, Minh-Nghia Nguyen, David Lauzon, Michel Barrette, Mehdi Bozzo-Rey, Simon Lessard, Alain Veilleux. A l'avant: Patrice Albaret, Karl Gaven-Venet, Benoît des Ligneris, Francis Giraldeau. Etait absent de la photo: Jean-Philippe Turcotte, Carol Gauthier, Xavier Barnabé Thériault et Mathieu Lutfy

De gauche à droite: Alain Veilleux, Michel Barrette, Jean-Phillipe Turcotte, Carol Gauthier, Patrick Vachon et le 1er noeud d'Elix

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

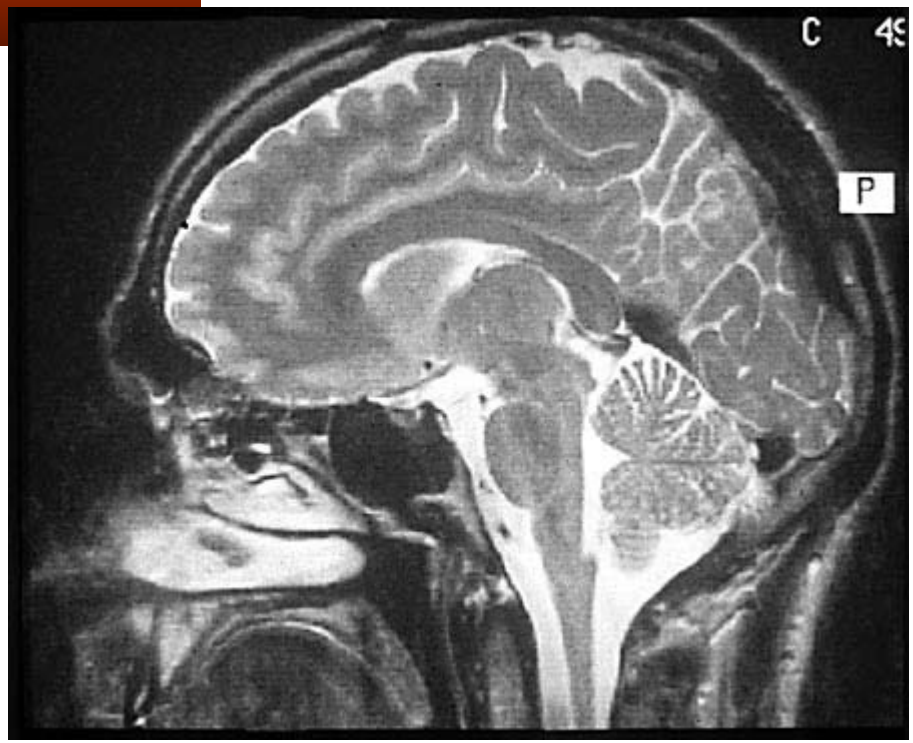
# Mammouth, série

# Lignes à transmission

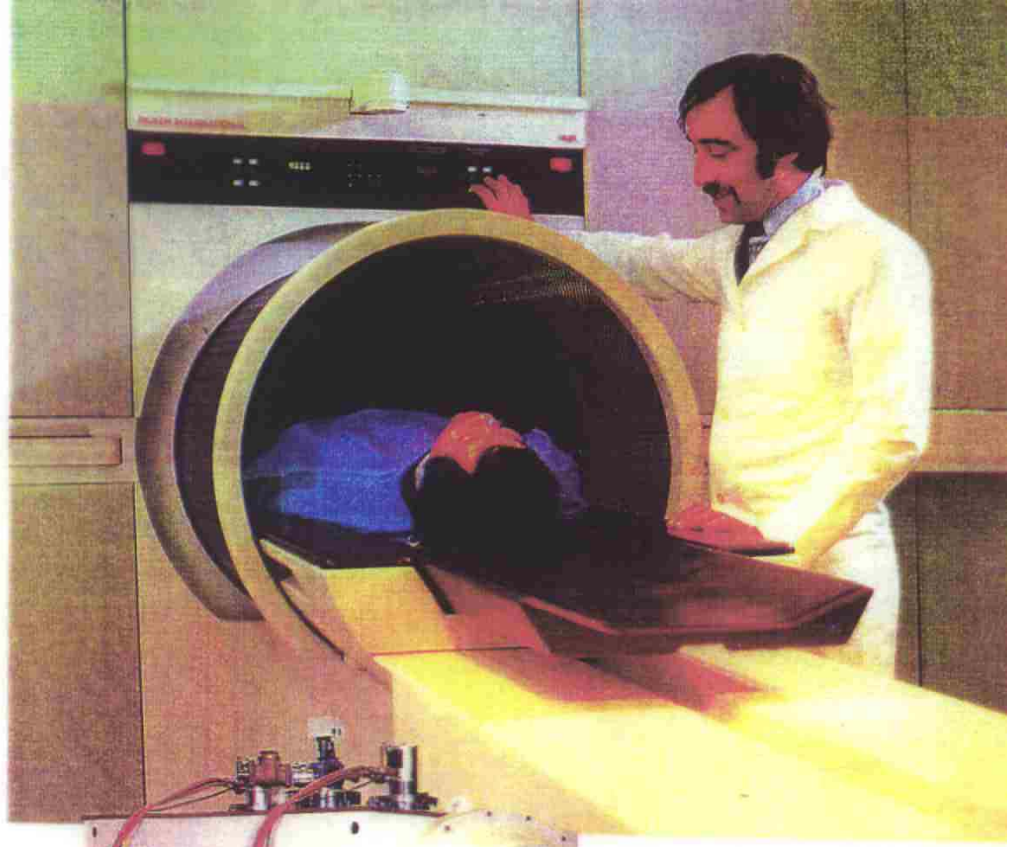


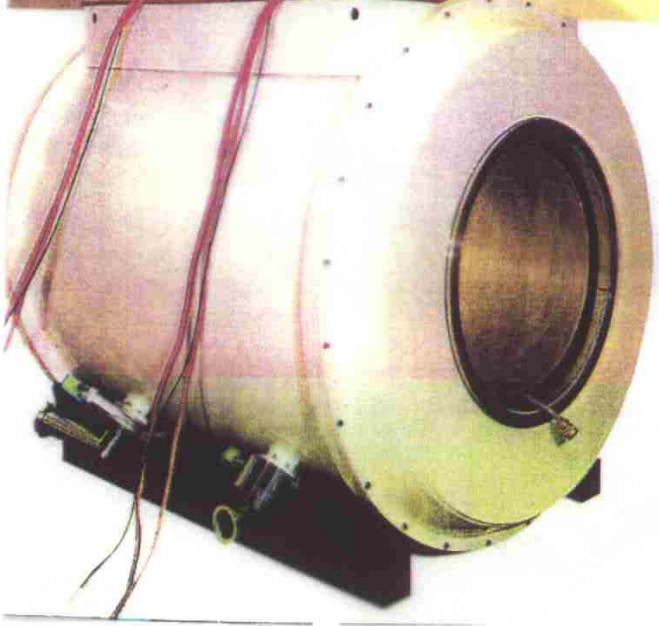
# MAGLEV

# Imagerie par Résonance Magnétique (MRI)




**Recherche :** 1) Plus hauts champs
2) Autre façon de détecter (SQUID)





By the end of 1984 the three manufacturing plants had between them produced more than 400 magnets for clinical MR imaging and spectroscopy applications at permanent hospital sites, many times more than the total of all other producers worldwide. Oxford is far ahead as the only manufacturer to have succeeded in making superconducting magnets in any quantity, and this in-depth experience helps to maintain the three companies' world market share at an extremely high level.

The customers for Oxford's MR imaging magnets include all the world's major manufacturers involved in the development of whole-body diagnostic scanners. They are international companies who are the leaders in medical

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE