

THE  
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
• AND  
JOURNAL OF SCIENCE.

—  
[FIFTH SERIES.]

OCTOBER 1897.

XI. *Cathode Rays.* By J. J. THOMSON, M.A., F.R.S.,  
Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge\*.

THE experiments† discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the æther to which—inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly æthereal, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate between views so different, yet experience shows that this is

## ***Supraconductivité: l'ancien et le nouveau***

### ***Un voyage de découvertes d'un siècle***

André-Marie Tremblay

*Centre de recherches en physique du solide*

*C.R.P.S. et I.C.R.A.*

*Université de Sherbrooke*

---

### **L'ancien**

- En cherchant ce qui advient de la loi d'Ohm près du zéro absolu
- La mécanique quantique
- L'effet Meissner
  - Lévitation (sustentation) magnétique
- À la recherche d'une explication: une série d'échecs et un triomphe
- La théorie BCS (1957)
- Un premier âge d'or
- La disparition

## Le nouveau

- Le rêve de la supraconductivité à haute température
  - 1987: la révolution
  - 10 ans plus tard , le mystère plane toujours
  - Les électrons fortement corrélés
  - Ce qui se passe au confluent des rivières Magog et St-François.
- 

## Remerciements:

*Professeur Jules Carbotte*

- *Directeur du programme de l'institut canadien de recherches avancées*
- *Université McMaster*

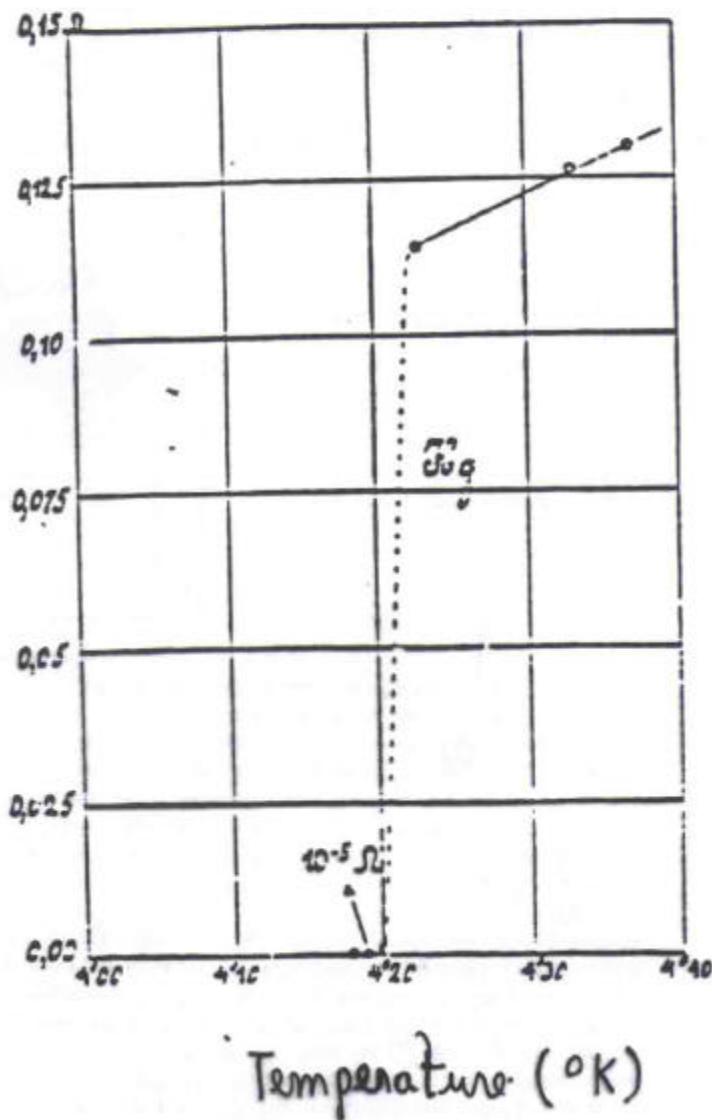
## L'ancien

- En cherchant ce qui advient de la loi d'Ohm près du zéro absolu
  - J.J. Thomson vient de découvrir l'électron en octobre 1897.
  - 3 ans plus tard, (1900) Drude propose une théorie des métaux basée sur l'idée d'un gaz d'électrons libres ( $10^{22}$ ).
  - Grâce à la liquéfaction des gaz, on se rapproche de plus en plus de  $T = 0 \text{ K}$ , dont l'existence a été comprise il y a environ 50 ans.
  - Qu'advient-il de la résistance des métaux à  $T=0$ ? Il semble qu'on doit avoir  $R = 0$  ou  $R = \text{infini}$ .
  - Le hollandais Kamerlingh Onnes en 1911 vient de liquéfier l'hélium, ce qui lui permet d'atteindre  $T = 4K$

# Electrical Resistance of Hg

Kamerlingh Onnes 1911

Perfect conductivity





Kamerlingh Onnes and the apparatus with which he liquefied helium in 1908.  
RIJKSMUSEUM VOOR DE GESCHIEDENIS DER NATURWETENSCHAPPEN

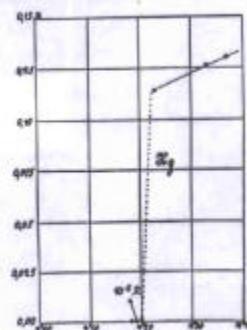
(above right) Heike Kamerlingh Onnes, "the gentleman of *absolut zero*," built the prototype of the modern scientific laboratory at the University of Leiden. His explorations of the properties of matter chilled to the temperature of outer space led him to the discovery of superconductivity in 1911, for which he would receive the Nobel Prize two years later.

RIJKSMUSEUM VOOR DE GESCHIEDENIS DER NATURWETENSCHAPPEN



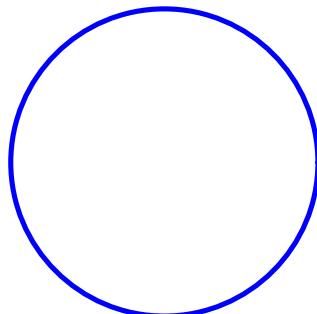
The discovery of superconductivity. The original graph made by Kamerlingh Onnes of the resistance, in ohms, of mercury (chemical symbol Hg) versus temperature. At just above 4.2 K the slowly falling resistance plunges suddenly to zero.

AIP NIELS BOHR LIBRARY-PHYSICS TODAY COLLECTION



- Pas de résistance au courant électrique

- Pas de dissipation de l'énergie électrique en chaleur (pas d'effet Joule)



Une boucle supraconductrice fermée transporte du courant indéfiniment.

---

### **Applications qui viennent à l'esprit:**

Lignes de transmission  
Électroaimants

---

<http://www.nobel.se>

### **1913: Nobel de physique**

*Au professeur H. Kamerlingh Onnes de Leiden,  
pour ses expériences sur les propriétés de la  
matière à basse température qui ont mené,  
concomitamment, à la production de l'hélium  
liquide.*

## L'ancien

### • La mécanique quantique

---

- Planck environ 1900 et Einstein 1921:  
La lumière (onde) se comporte parfois comme si elle était formée de particules d'énergie  $hn$  ( $h$  est la constante de Planck)
- de Broglie 1924: La matière se comporte parfois comme si elle était une onde de longueur d'onde  $I = \frac{h}{mv}$
- 1926
- Schrödinger: équation d'onde
- Heisenberg: mécanique matricielle
- Bohr: principe de complémentarité
- Concept "d'état quantique"
- Permet de comprendre en détail le comportement des atomes à l'échelle microscopique (mais pas encore la supra.)

## Physique 1906

THOMSON, Sir JOSEPH JOHN, Great Britain,  
Cambridge University, \* 1856, † 1940:

*"en reconnaissance de la valeur de ses études théoriques et expérimentales sur la conduction de l'électricité dans les gaz. "*

## Physique 1937

DAVISSON, CLINTON JOSEPH, U.S.A., Bell Telephone Laboratories, New York, NY, \* 1881, † 1958; and

THOMSON, Sir GEORGE PAGET, Great Britain, London University, \* 1892, † 1975:

*"pour leur découverte expérimentale de la diffraction des électrons par les cristaux. "*

## **L'ancien**

- L'effet Meissner
- 

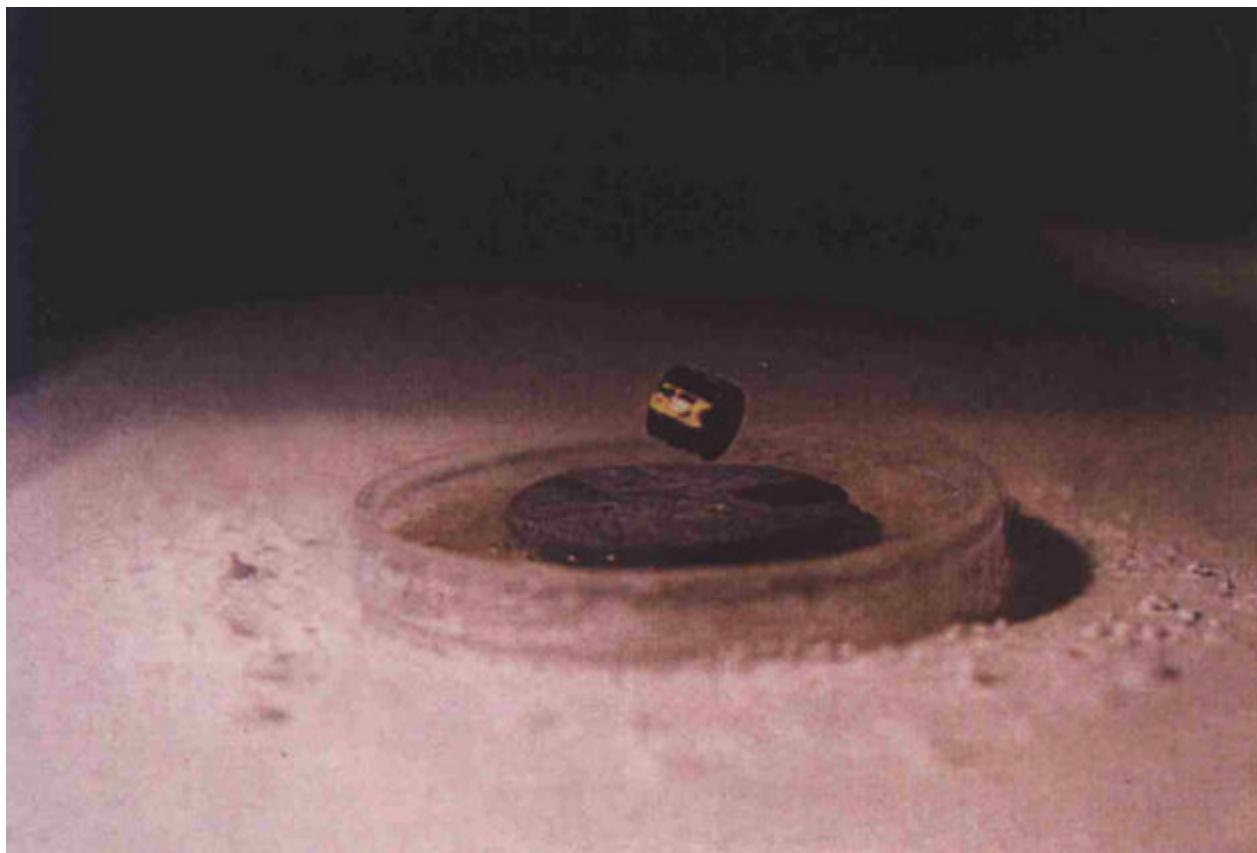
**1933:** Une découverte majeure pour la suprconductivité.

- W. Meissner et R. Ochsenfeld observent qu'un supraconducteur n'est pas seulement un bon conducteur mais aussi possède un diamagnétisme parfait!

Le diamagnétisme parfait s'appelle l'effet Meissner

On a un supraconducteur s'il possède les deux propriétés suivantes (doivent absolument être vérifiées)

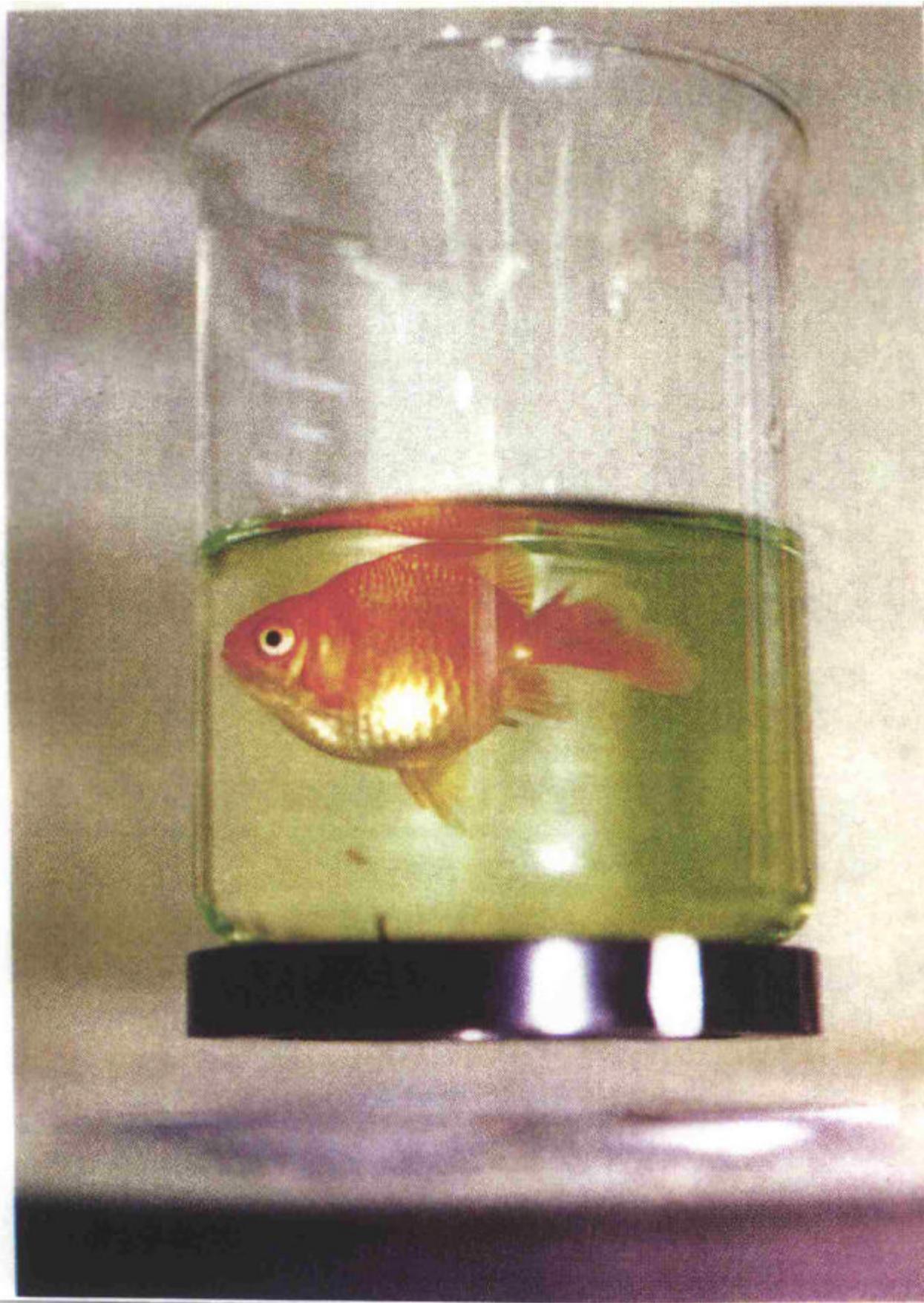
1. Résistance nulle
2. Diamagnétisme parfait



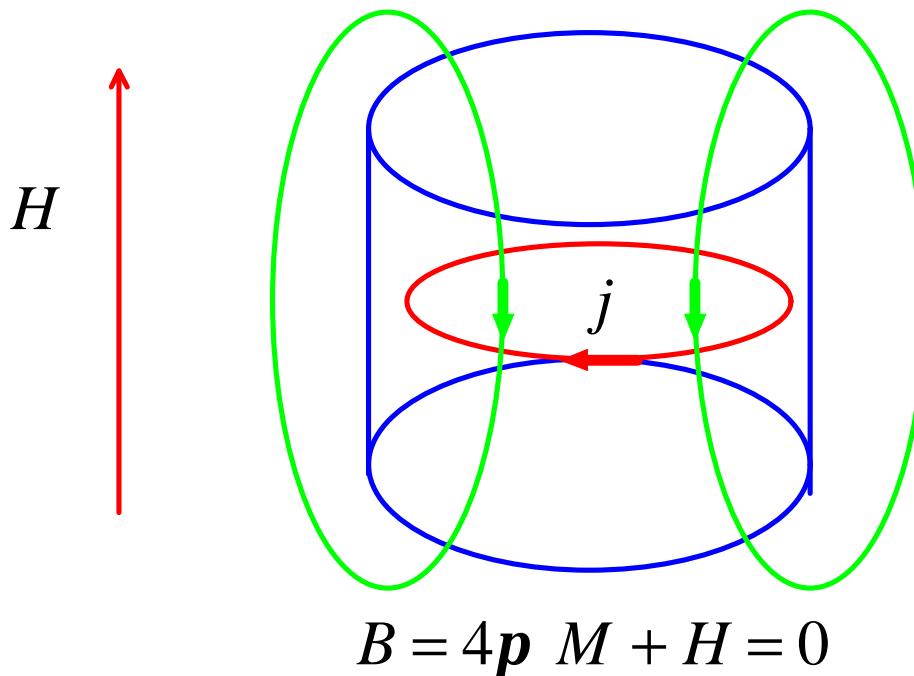


**TOSANOUNI**  
(Sumo Wrestler)

Height of Tosanoumi 186cm  
Weight of Tosanoumi 142kg  
Weight of wife 50kg  
Total weight 202kg



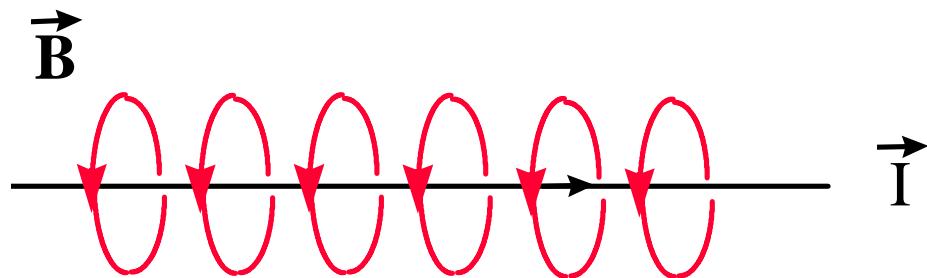
## Effet Meissner:



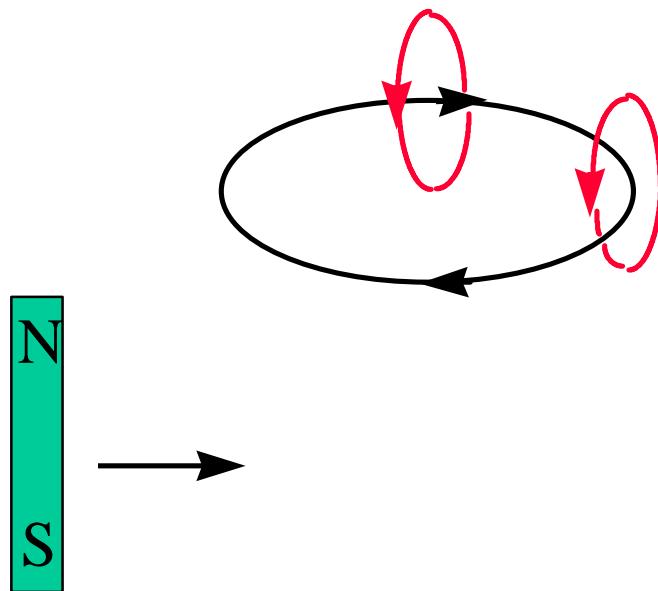
L'augmentation de champ magnétique externe  $H$  génère un courant dans le supraconducteur, qui à son tour génère une induction magnétique qui s'oppose au champ appliqué.

- Induction de Faraday (Henry) (environ 1831)
- Loi d'Ampère

## Loi d'Ampère:



## Loi de Faraday (induction) (1831) :

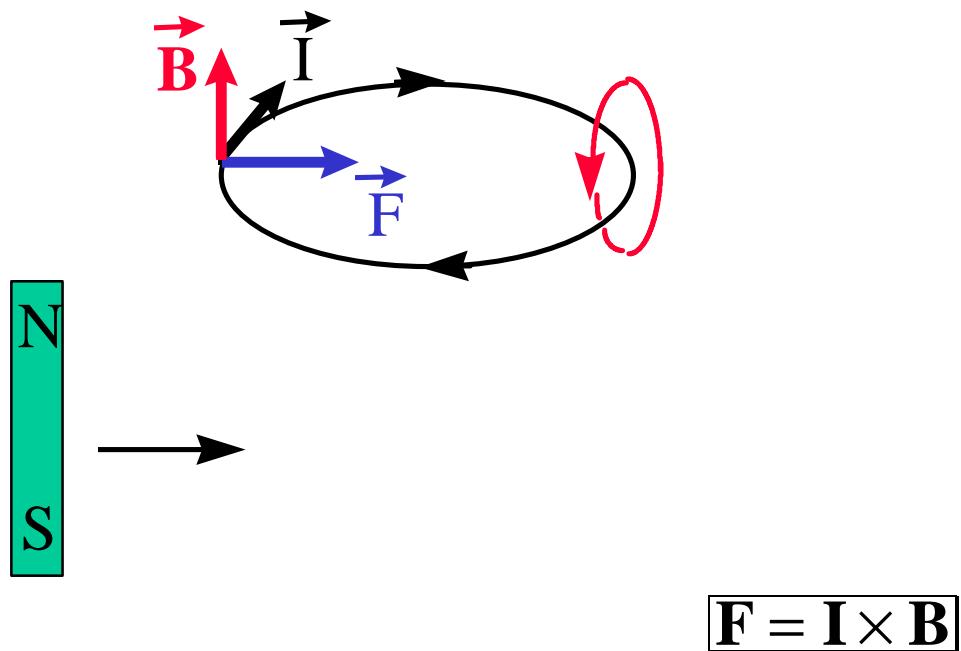


## Loi de Lenz:

*Le champ magnétique induit s'oppose à l'augmentation du flux magnétique*

## Forces:

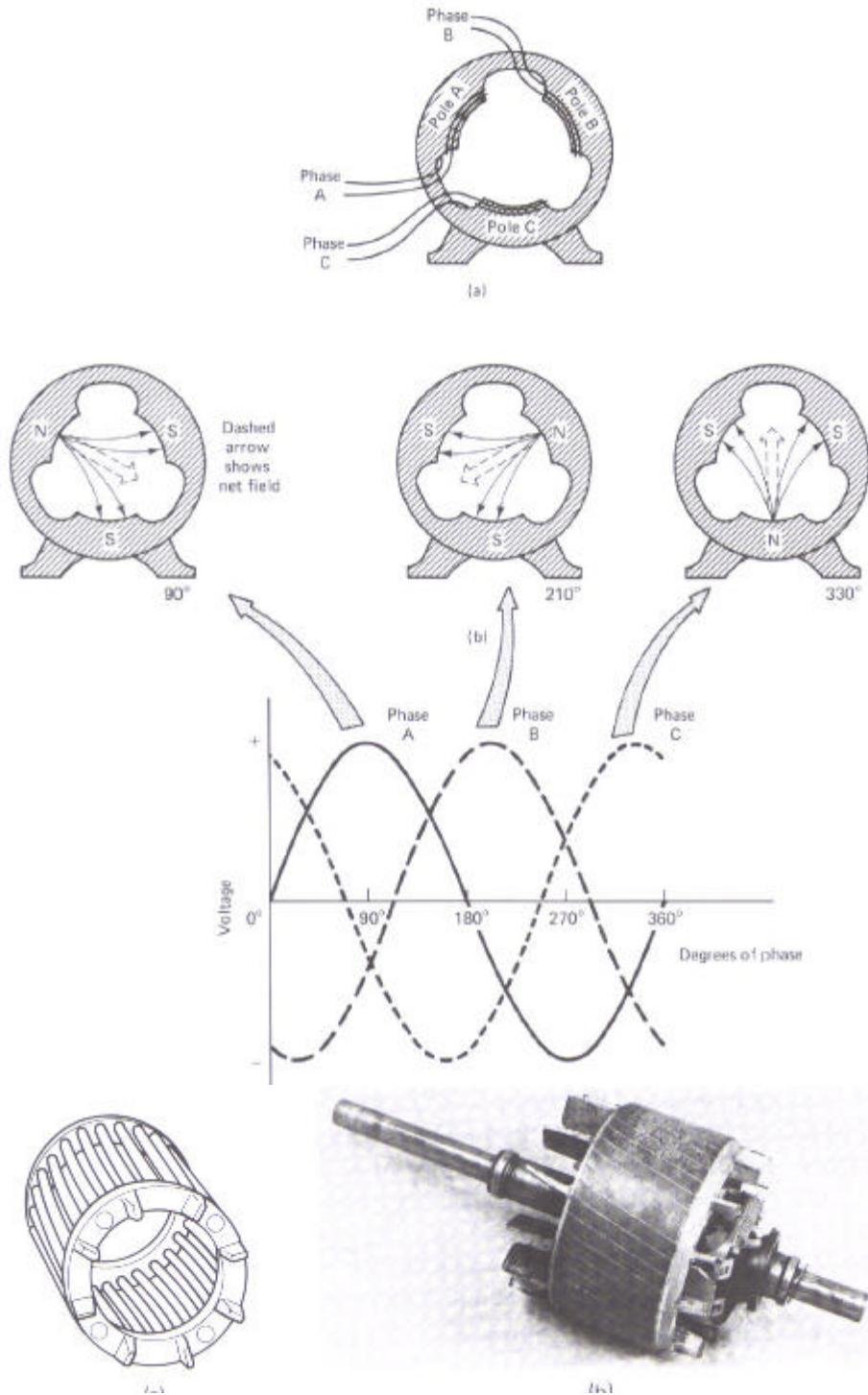
- Loi de Lenz implique que aimant et aimant induit se repousseront
  - (pôles identiques se repoussent lorsque l'aimant s'approche, pôles opposés se s'attirent lorsque l'aimant s'éloigne)
- Une analyse plus détaillée basée sur la force de Lorentz arrive à la même conclusion.



• Tesla (environ 1880) (Ref: R.A. Honeycutt, TK 145 .H743 1986)

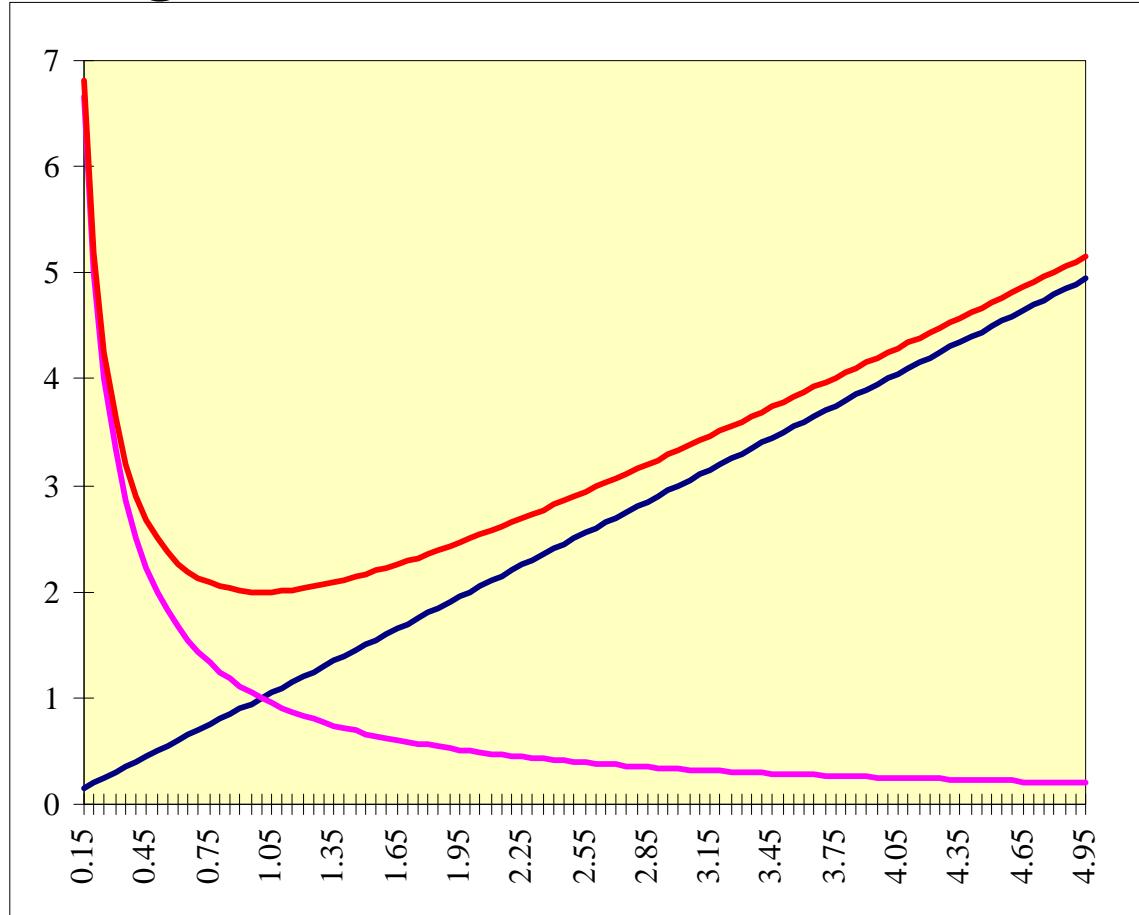
AC Induction Motor Action

135



# Lévitation de l'aimant par le supra.

Énergie



Hauteur

Énergie potentielle  $mgh$  :



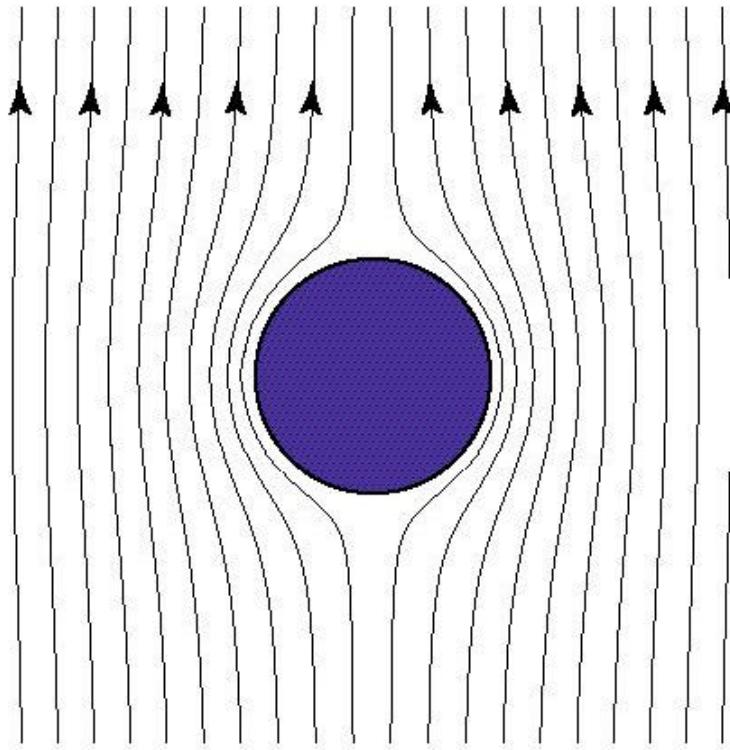
Énergie pour lignes de flux :



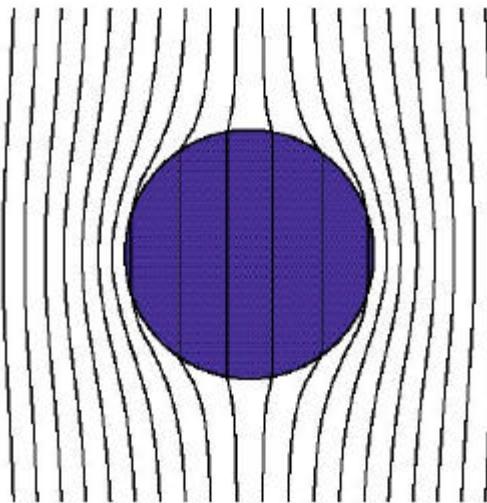
Résultante :



## Type 1 : exclusion totale du flux



## Type 2 : pénétration sous forme de fluxoïde



$$\Phi_{0 \text{ supra}} = \frac{hc}{2e}$$

## L'ancien

- 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*"
  - Einstein, Bohr, Heisenberg ...





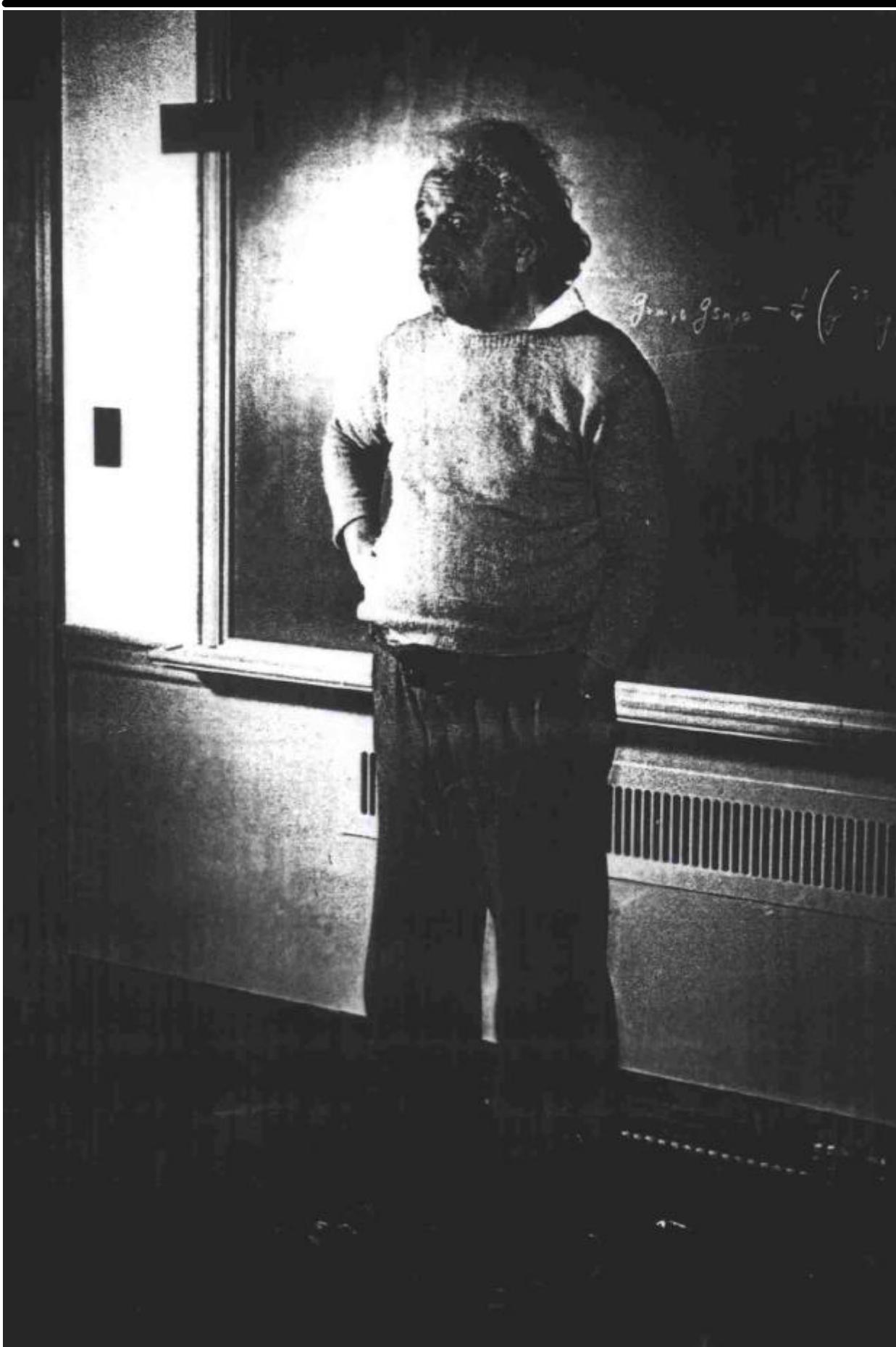
NIELS BOHR (1885–1962) introduced the idea that the electron moved about the nucleus in well-defined orbits. This photograph was made in 1922, nine years after the publication of his paper



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

**CRPS SHERBROOKE**

---



THE EDITOR

243

Bose-Einstein Condensation of Trapped Electron  
Pairs. Phase Separation and Super-  
conductivity of Metal-Ammonia  
Solutions

RICHARD A. OGG, JR.

*Department of Chemistry, Stanford University, California*

March 2. 1946

Phys. Rev. 69, 243 (1946)

“In Ogg’s theory it was his intent  
That the current keep flowing, once sent;  
So to save himself trouble,  
He put them in double,  
And instead of stopping, it went.”

- G. Gamow

## L'ancien

- La théorie BCS (1957)
- 

John Bardeen, Leon Cooper, Robert Schrieffer

*Comportement quantique à l'échelle  
macroscopique*

## Prix Nobel de physique 1972

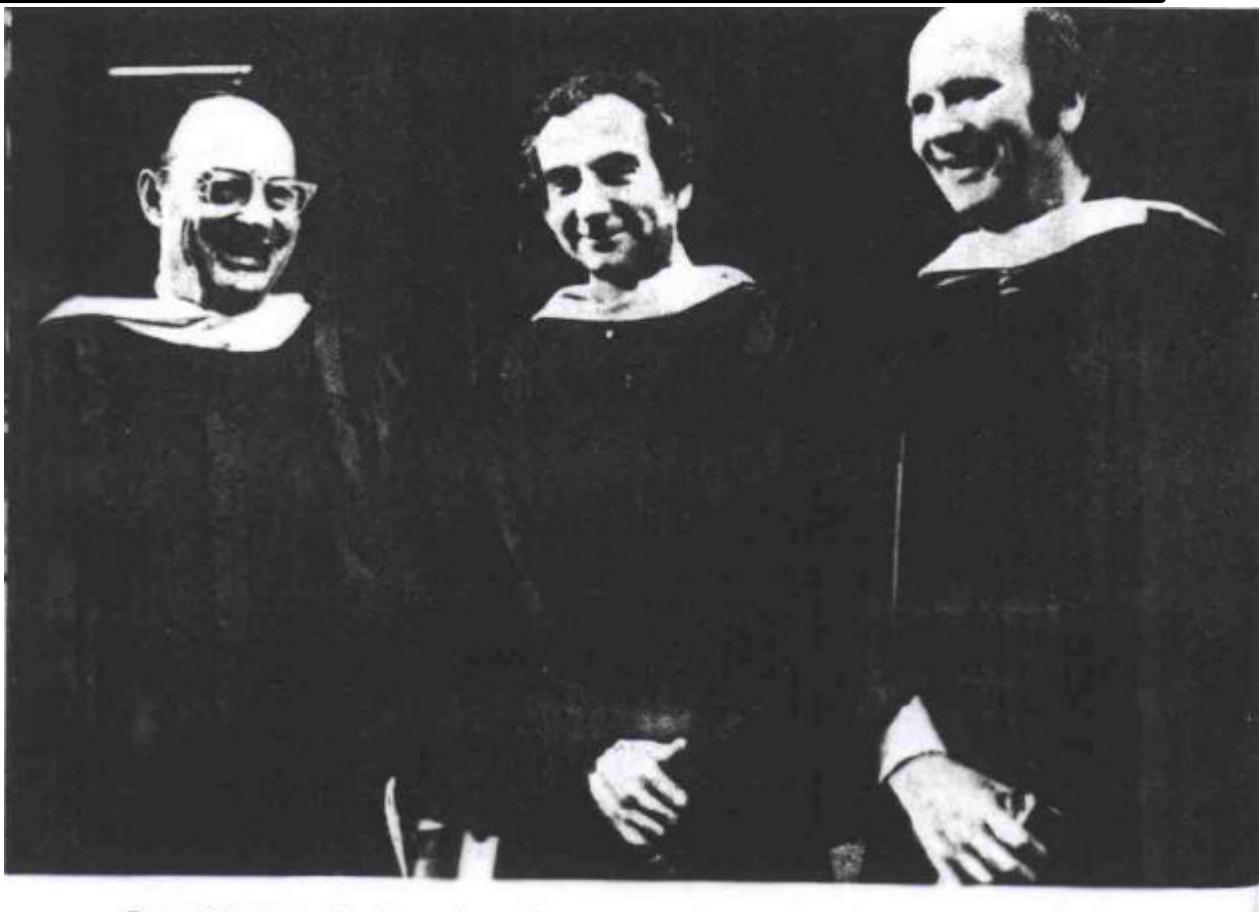
En 1956, Bardeen avait obtenu le Nobel de physique pour l'invention du transistor:

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

*Bardeen est le seul à avoir obtenu deux prix Nobel de Physique:*

## Mme Curie:

1903 Physique avec H.A. Becquerel  
1911 Chimie (seule)



Juillet 1977, Wolfeboro, N.H. :

Gordon Research Conference on

*"Nonequilibrium Phenomena in  
Superconductors and Superfluids"*,

John Bardeen



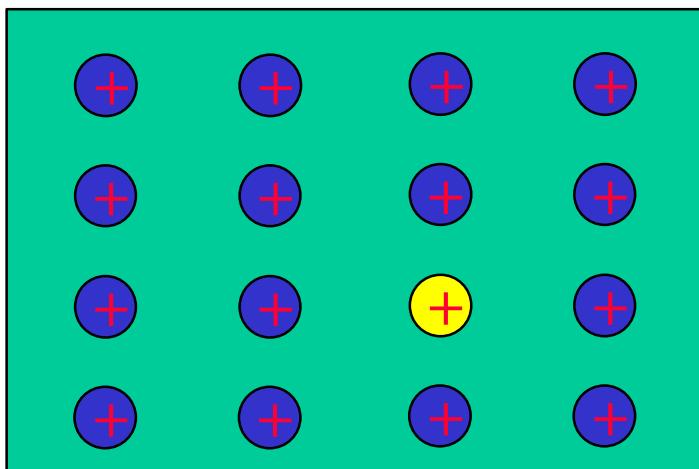
Garde chasse

Bruce Patton

Tony Leggett

## Électrons dans un métal normal:

- Modèle d'électrons "itinérants". Les électrons se promènent dans des directions aléatoires.

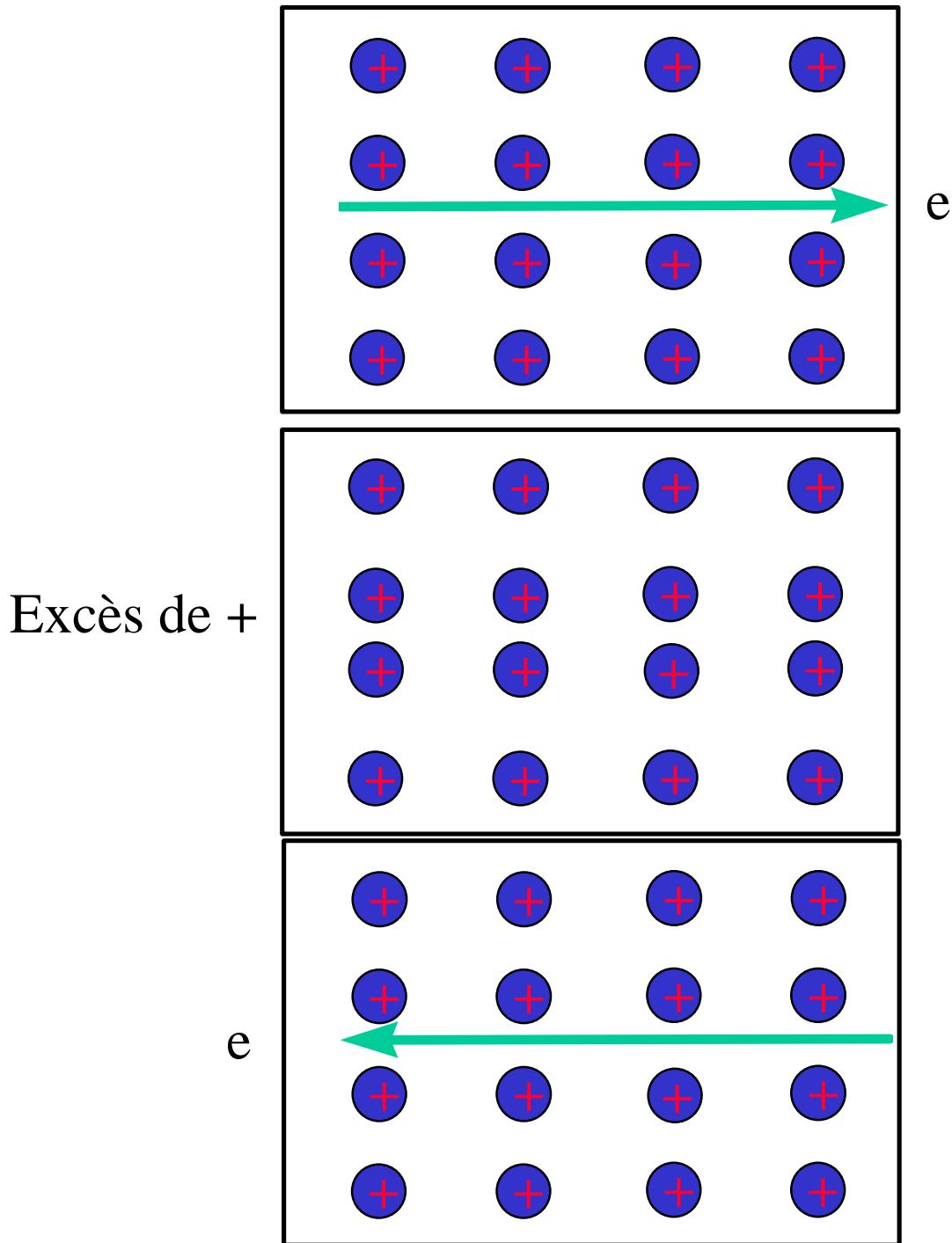


- Le champ électrique  $E$  leur donne une vitesse additionnelle de dérive de telle sorte qu'un courant se développe dans la direction  $E$ .
- Sans impuretés ou vibrations thermiques, la M.Q. nous dit que le courant doit circuler sans résistance (Possible seulement à  $T = 0$ ) malgré la présence du réseau cristallin.
- Les impuretés diffusent les électrons dans des directions aléatoires: Augmentation d'entropie, résistance électrique.

# Supraconductivité:

## Ingrédient #1

Attraction et formation de paire de Cooper



Les électrons forment des "paires de Cooper" qui se recouvrent.

## 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!).

---

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

$$I = I_0 \sin f$$
$$\frac{df}{dt} = \frac{2eV}{\hbar}$$

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

## Physique 1973

Le prix a été divisé, une moitié sera partagée par

ESAKI, LEO, Japan, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, U.S.A., \* 1925; and

GIAEVER, IVAR, U.S.A., General Electric Company, Schenectady, NY, \* 1929 (in Bergen, Norway),

*"pour leur découverte expérimentale de l'effet tunnel dans le semiconducteurs et les supraconducteurs, respectivement."*

et l'autre moitié par:

JOSEPHSON, BRIAN D., Great Britain, Cambridge University, Cambridge, \* 1940:

*"pour ses prédictions théoriques des propriétés des supracourants dans les barrières tunnel, en particulier pour les phénomènes généralement connus sous le nom d'effets Josephson."*

## **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.

## L'ancien

- Un premier âge d'or

---

- Un premier âge d'or de la supraconductivité commença tout de suite après la découverte de BCS et dura pendant environ 15 ans.

- Il y avait maintenant un cadre conceptuel permettant aux gens de

1. Faire des prédictions théoriques sur les propriétés des supraconducteurs.

2. Mettre au point de nouvelles expériences.

# À la recherche de nouveaux matériaux supraconducteurs

---

Référence: Bernd Matthias, 1971

Domaines de  $T_c$  connus

1951 (0.4 K à 16 K)

1971 (0.002 K à 21 K)

"Vedette":  $Nb_3(Al_{0.75}Ge_{0.25})$

Été de 1973:

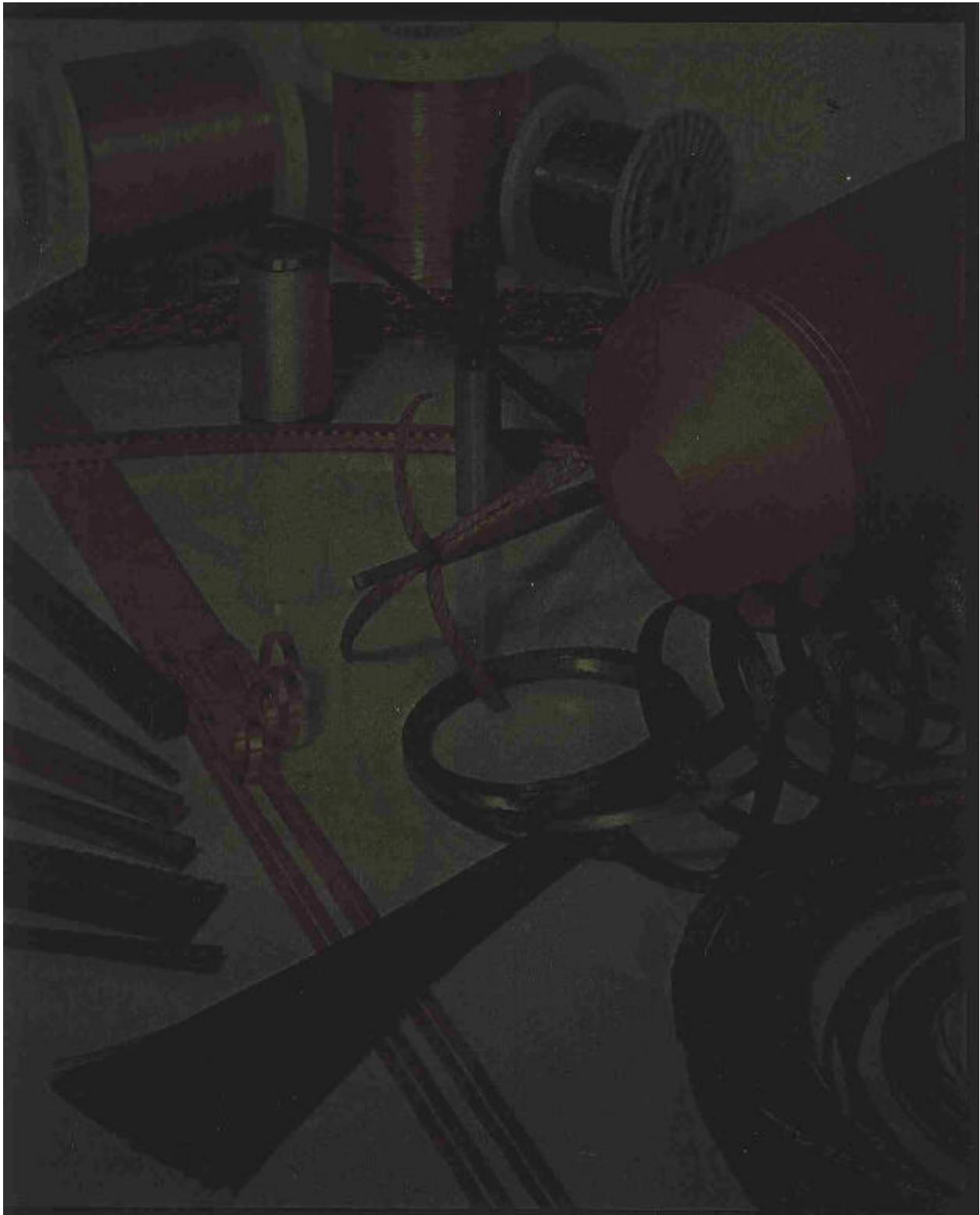
Films pulvérisés de  $Nb_3Ge$  (23 K)

Record jusqu'en 1986...

**Matériaux commerciaux pour les aimants**

$NbTi$  atteint 8 Tesla

$Nb_3Sn$  atteint 18 Tesla (1 T = 10,000 G)



**1962**

## **Applications des aimants supraconducteurs:**

Imagerie par résonance magnétique dans les hôpitaux

Purification du charbon

Aimants pour la purification des eaux

Aimants pour le confinement du plasma des futurs réacteurs à fusion

Aimants pour les trains grandes vitesse

(Japon: ML 500)

Alimentation stable en courant (Hydro-Québec)

SMES

Superconducting Magnetic Energy Storage  
Stockage magnétique d'énergie  
supraconducteur.

## Imagerie médicale par résonance magnétique:

Besoin d'aimant de 2 à 3 Tesla, ce qui est à la limite des aimants conventionnels qui consommeraient plusieurs centaines de KWatts de puissance.

25% du coût est pour l'aimant et le système de réfrigération à l'hélium pour les aimants supraconducteurs

1986:

300 appareils vendus pour un total de 600M\$  
Aujourd'hui: Quelques milliards de \$ US.

---

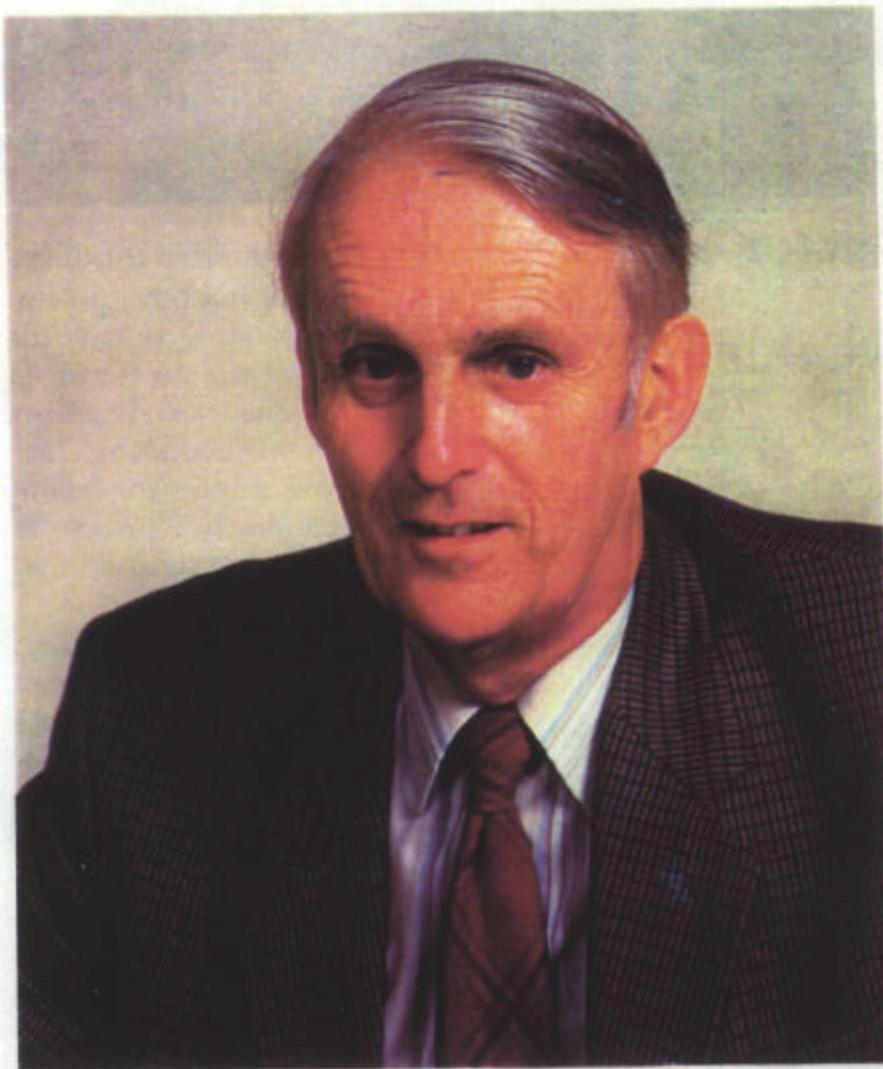
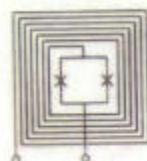


By the end of 1984 the three manufacturing plants had between them produced more than 400 magnets for clinical MR imaging and spectroscopy applications at permanent hospital sites, many times more than the total of all other producers worldwide. Oxford is far ahead as the only manufacturer to have succeeded 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

# Supercurrents

*The Superconductivity Magazine*



Sir Martin Wood  
Founder, Oxford Instruments

## **Séparation du charbon:**

Le charbon et ses polluants, particulièrement le souffre, ont des propriétés magnétiques différentes.

On peut séparer les deux en les pulvérisant puis en les séparant par l'application d'un gradient de champ magnétique

- Moins de pollution de l'air dû au souffre.
- 

## **Filtration de l'eau**

Mettre des particules magnétiques qui piègent la poussière

Enlever la poussière par l'application d'un gradient de champ magnétique.

---

## Les trains rapides:

Shinkansen au Japon "Train balle de fusil"

Tokyo à Hakata, 1069 km en moins de 7 heures

Nagoya, Koyoto, Osaka, Okayama,  
Hiroshima

Rails conventionnels: confortable, climatisé

Vitesse Max: 210 km/h

Très Grande Vitesse (TGV) trains de la SNCF  
France, depuis Septembre 1981

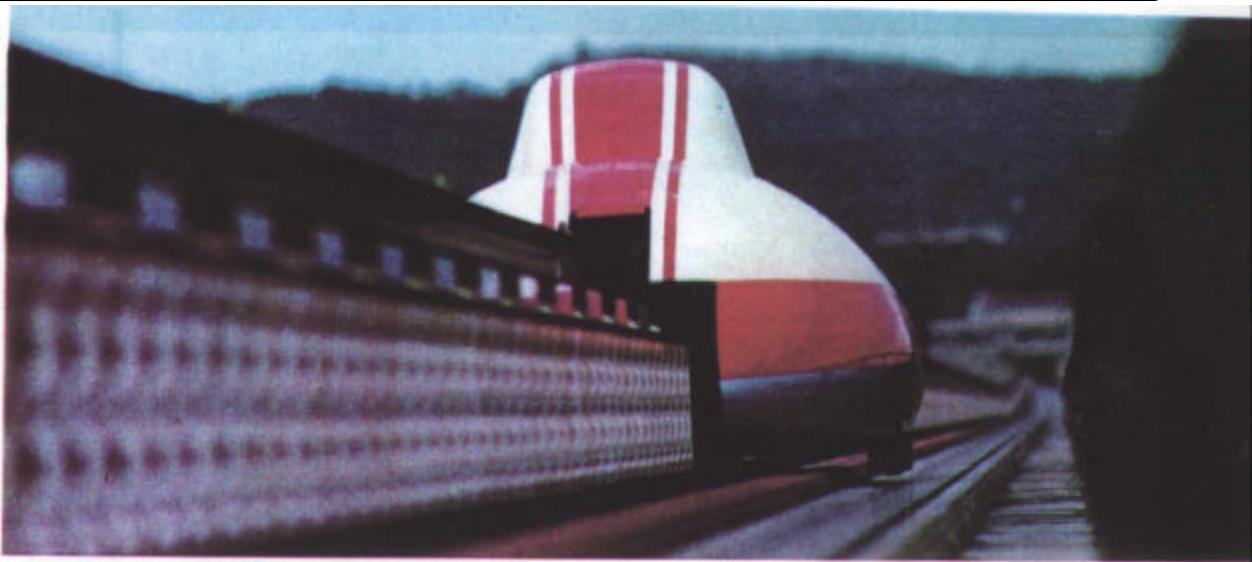
Paris-Lyon en deux heures

Rails conventionnels: confortable, climatisé

Vitesse Max: 270 km/h

Nouvelle génération à lévitation magnétique

Vitesse 500 km/h



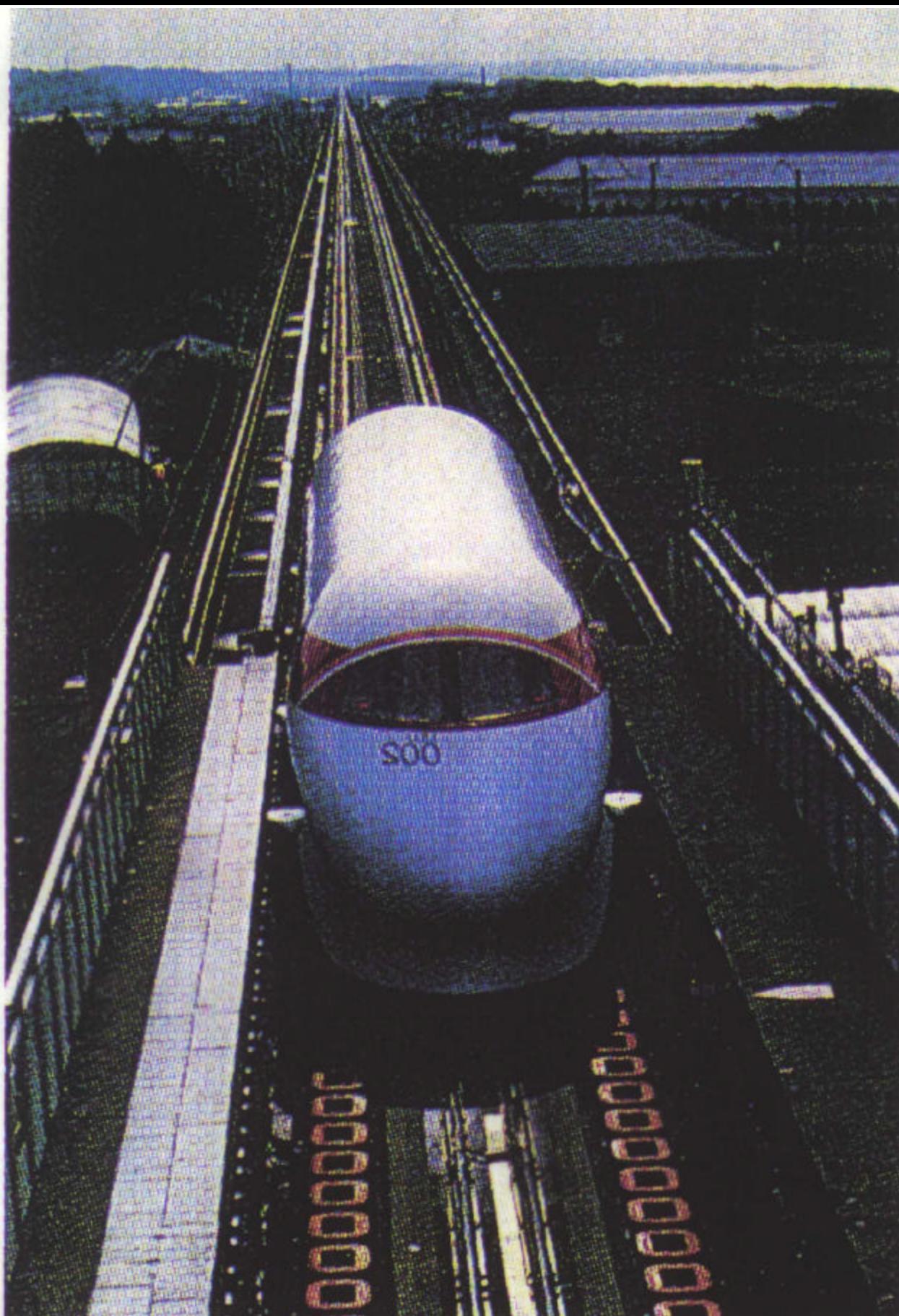
■浮上走行中の浮上体

ML 500

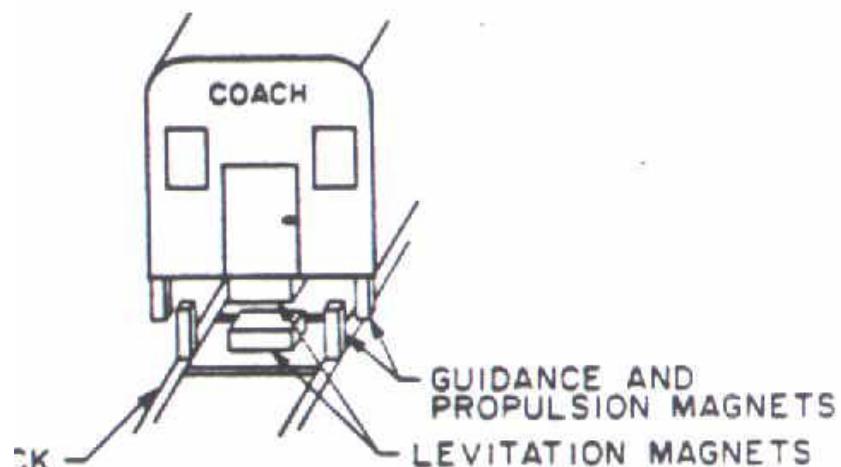
JNR

■斜め後方からの  
浮上体とガイドウェイ

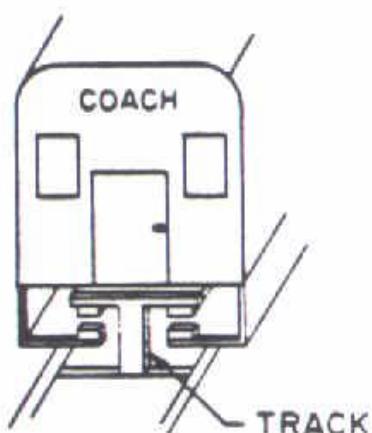




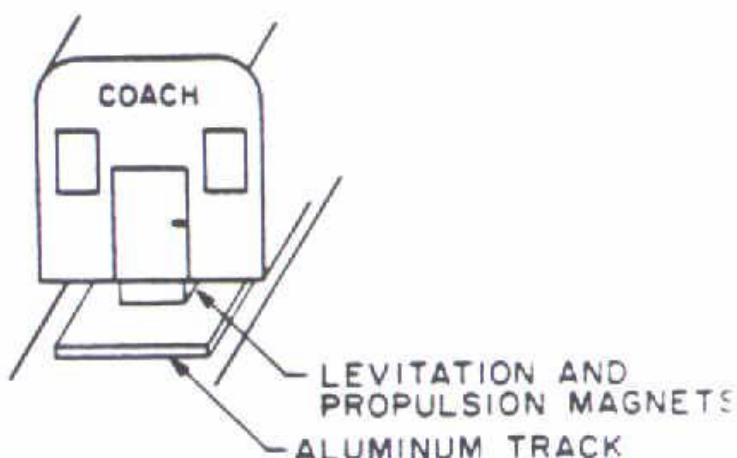
**REPULSION**

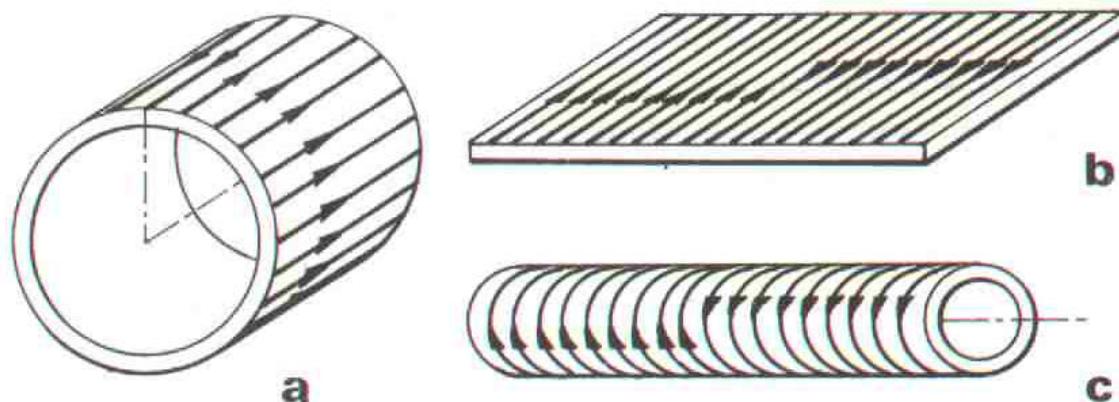


**ATTRACTION**

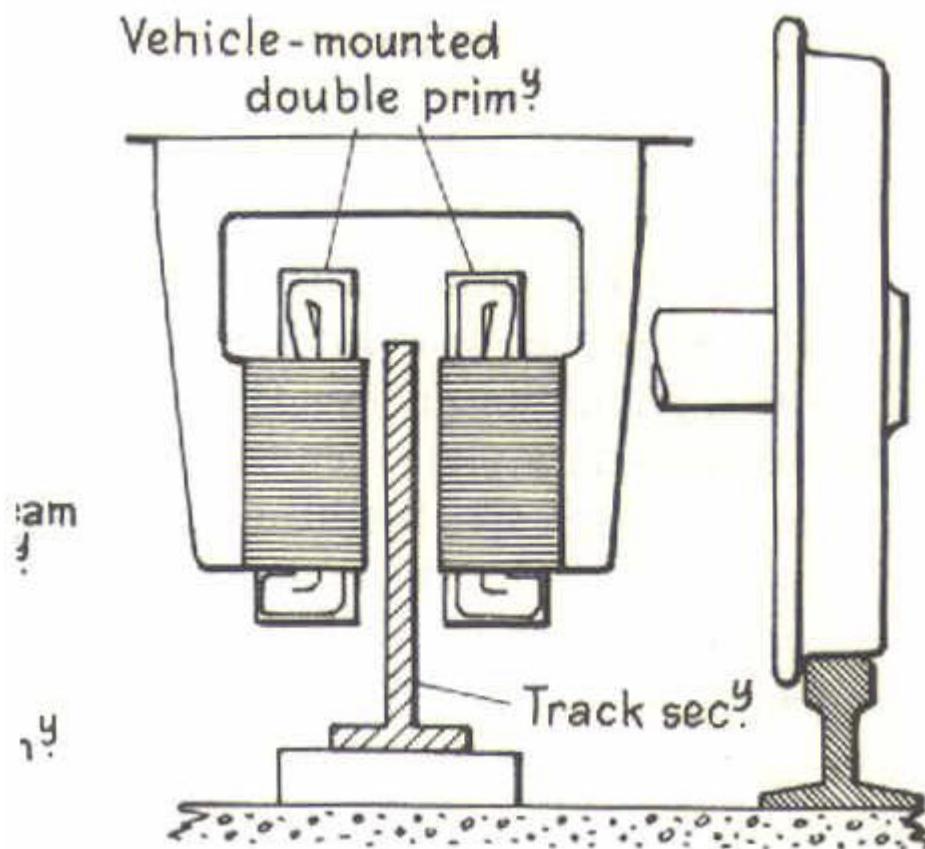


**ALUMINUM TRACK**

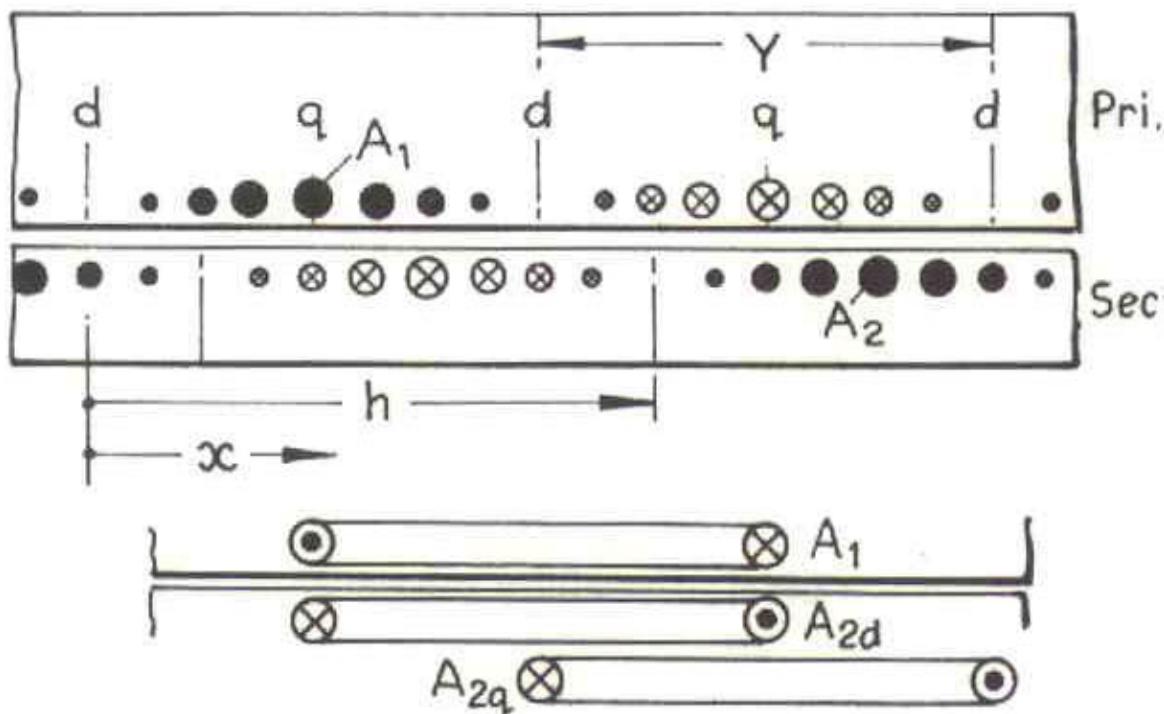




523



Référence: M.G. Say, TK 2711 .S3 1976



12.28 Conditions in flat linear induction motor.

## L'ancien

### • La disparition

---

- Dès 1970 plusieurs chercheurs avaient quitté le domaine
- La supraconductivité était un des phénomènes les mieux compris de la physique!
- En 1969, R.D. Parks édite une revue en deux volumes intitulée "Superconductivity"

Un des auteurs dit de ce traité: "*Il s'agit du dernier clou dans le cercueil de la supraconductivité*"

## Le nouveau

- Le rêve de la supraconductivité à haute température
- 

- Depuis 1964 au moins, on rêvait de supraconductivité à haute température. Little avait proposé que la polarisabilité des molécules organiques pourrait jouer le rôle des vibrations cristallines (phonons) et permettre la supraconductivité à haute température.
- Certains chercheurs isolés poursuivaient ce rêve.
- La barrière psychologique: **77 K**, la température de liquéfaction de l'azote (la majeure partie de l'air environnant)

L'azote liquide est moins cher que la bière la moins cher!

## Le nouveau

- 1987: la révolution
- 

### - Janvier 1986:

Alex Müller et Georg Bednorz à IBM Zurich découvrent des indications de la supraconductivité dans le système *Ba-La-Cu-O*

- Numéro de septembre 1986 de "Zeitschrift für Physik" (soumis le 17 avril 86)

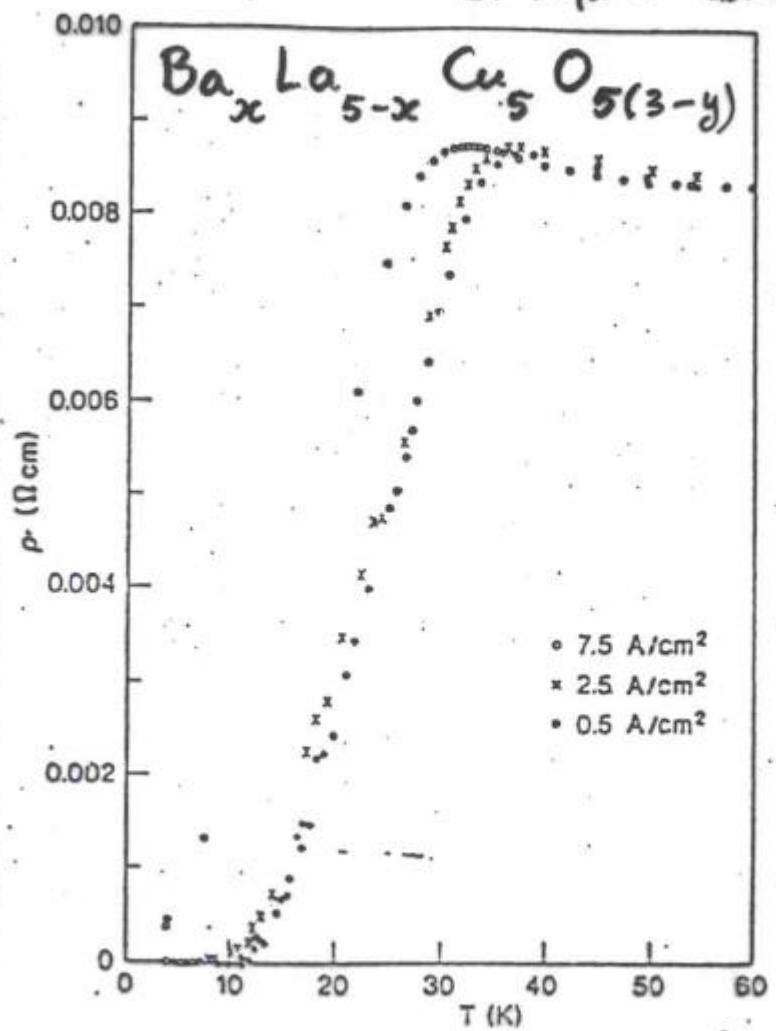
"Possibility of high  $T_c$  superconductivity in the *Ba-La-Cu-O* system"

- On ignore cet article... pour de bonnes raisons:

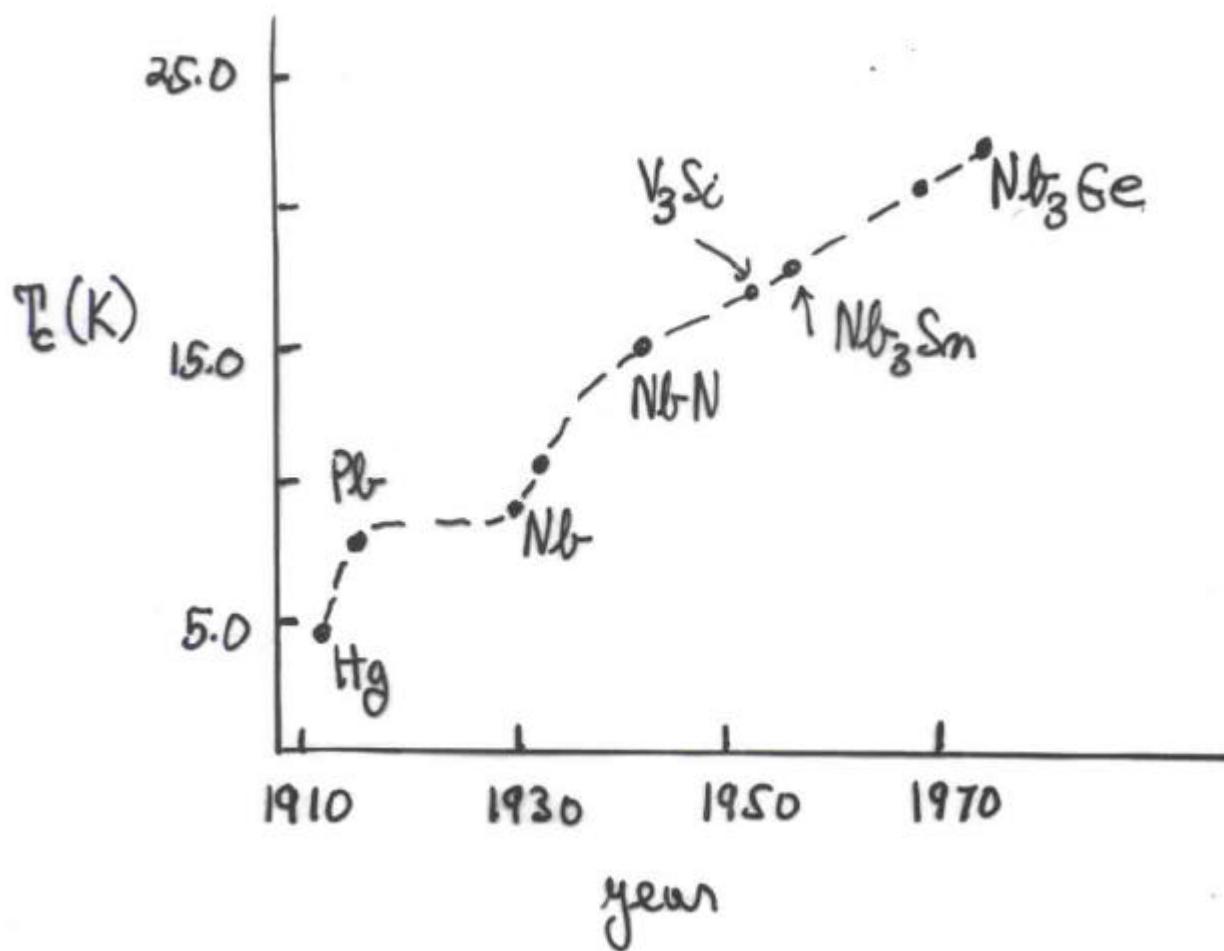
- transition vers  $R=0$  n'est pas bien marquée
- L'effet Meissner n'est pas vérifié

Bednorz and Müller,  
Z. Phys. B Cond. Matter 64,

189-193  
(1986)



Pour apprécier ce que voulait dire une température de transition d'environ  $30K$ , il faut se souvenir que :



**- Boston, "Materials Research Society"  
décembre 1986**

Présentation de Koitchi Kitazawa et Shoji Tanaka de Tokyo convainc tout le monde.

---

C'est la folie furieuse! Ces matériaux sont faciles à faire. En Chine, aux Indes, tout le monde y met la main.

On ne dort plus. La barrière de l'azote vient de se rapprocher tout d'un coup.

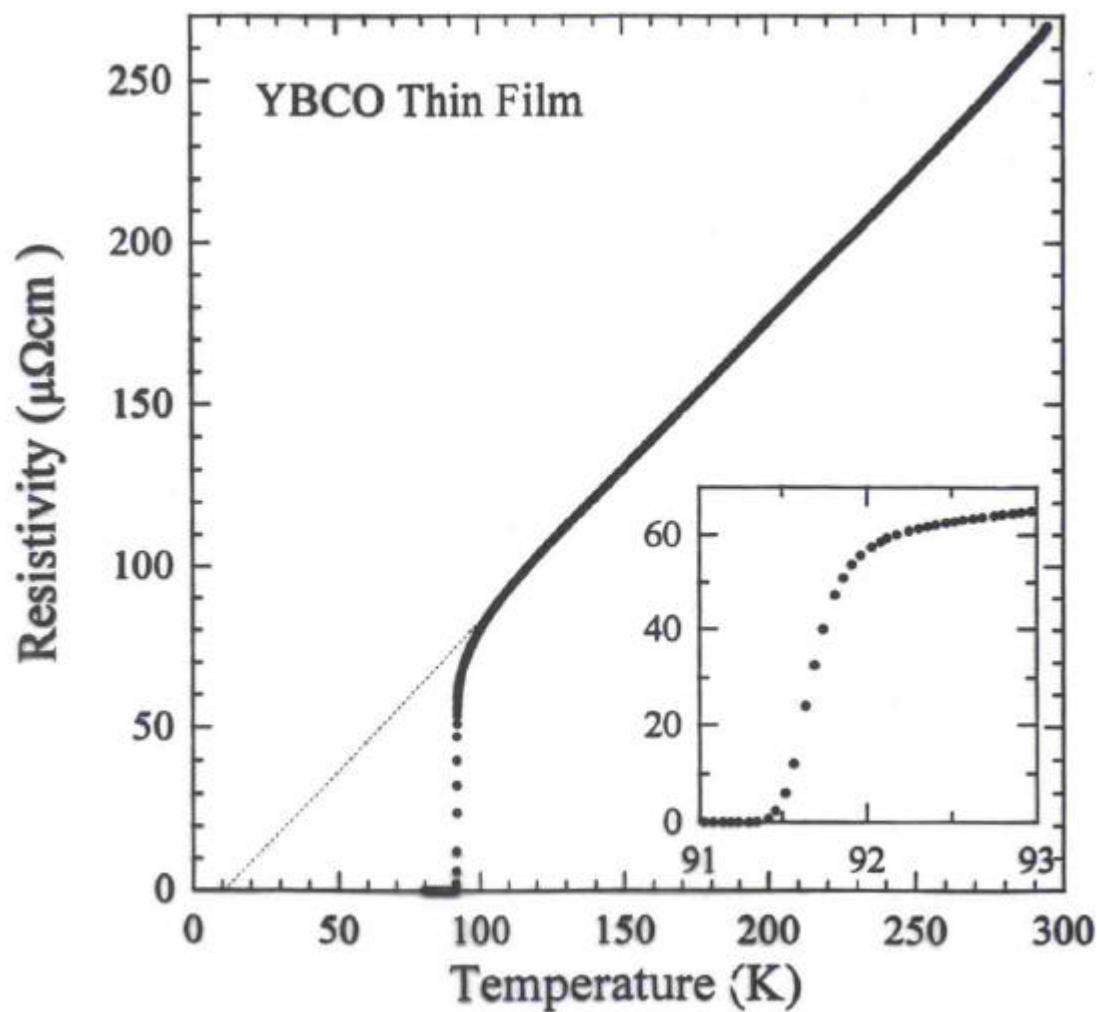
---

**- 16 février 1987, Houston:**

Une conférence de presse est convoquée par Paul Chu et son groupe pour annoncer la découverte de *Y-Ba-Cu-O*

$$T_c = 93 \text{ K}$$

C'est sans hésitation que la barrière de l'azote a été franchie



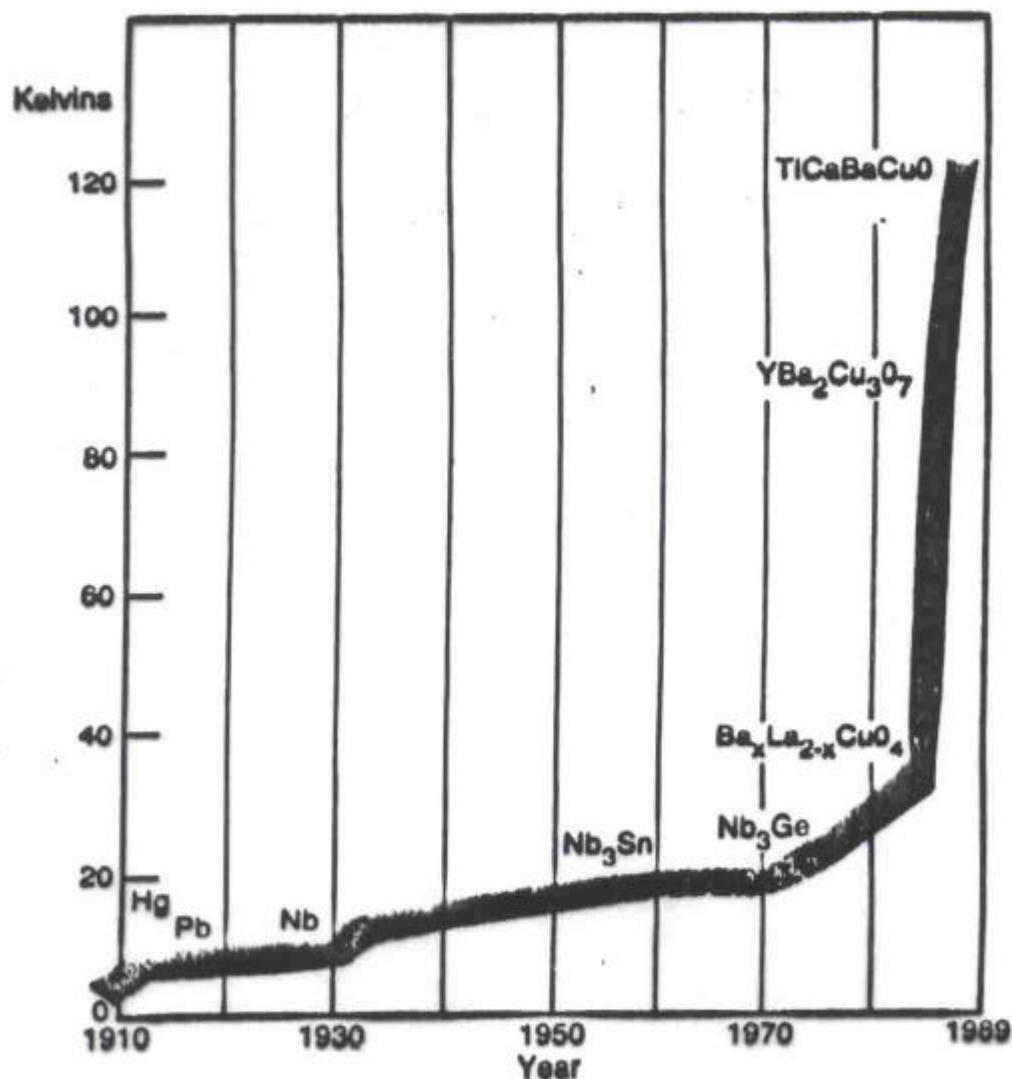


Figure 1.2. Increase in maximum value of  $T_c$  with time.

**- New York: March meeting of the American Physical Society.**

- On demande à Neil Ashcroft, (Cornell) président de l'American Physical Society de faire une session spéciale sur cette découverte: hésitation.... si on se couvrait de ridicule. On prend la chance.
- 18 mars 1987...

Titre du New York Times du lendemain:  
**"The Woodstock of Physics"**

3000 personnes jusqu'à 3 heures du matin

**Times, 11 mai 1987**

"They began lining up outside the New York Hilton Sutton Ballroom at 5:30PM for an evening session that would last until 3:00 AM"



The "Woodstock of physics." On March 18, 1987, thousands of physicists crammed a ballroom at the New York Hilton to celebrate the coming of the age of superconductivity.

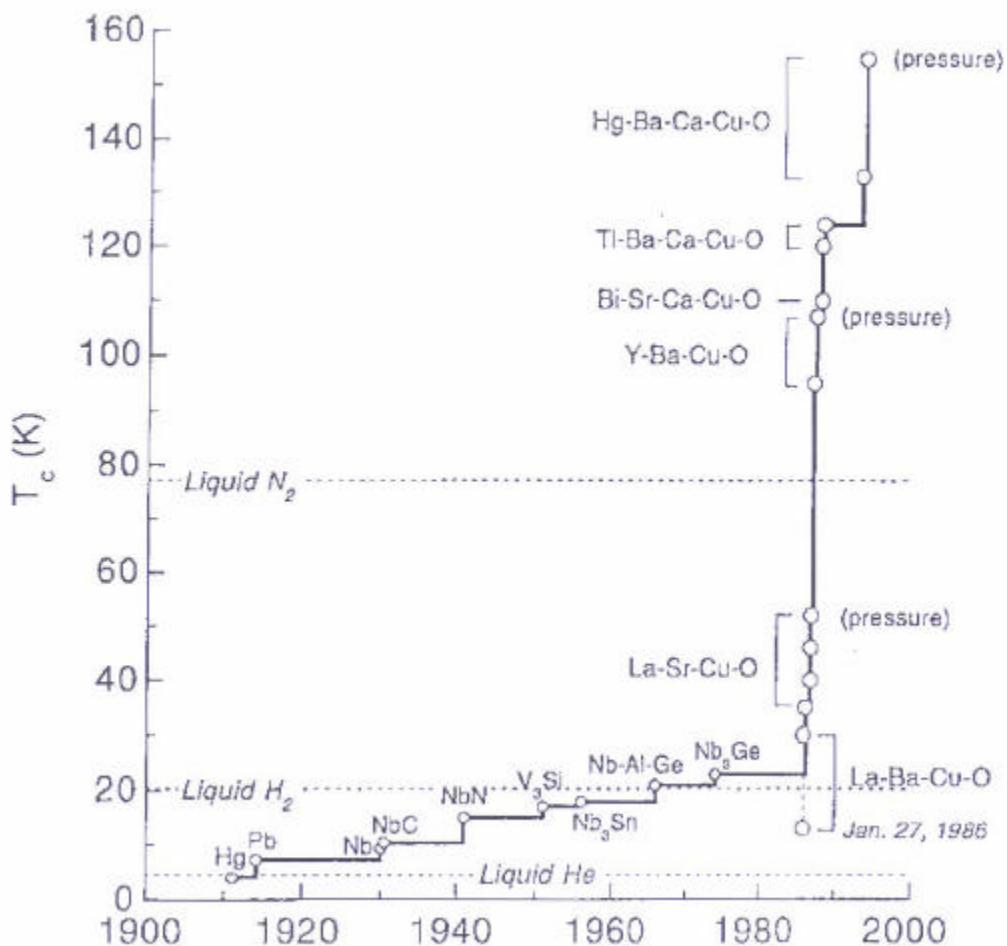
AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS

(right) Alex Müller, Paul Chu, and Shoji Tanaka, answering questions at the "Woodstock" meeting. Tanaka and Kaiichi Kitazawa were the first to confirm Bednorz and Müller's discovery, launching a worldwide race to find still better superconductors.

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS



cond-mat/9802202 19 Feb 1998



<b>Composé</b>	<b>Tc</b>
$La_{2-x}Sr_xCuO_4$	~36
$YBa_2Cu_3O_7$	~96
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	~83
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	~115
$Tl_2Ba_2CuO_6$	~80
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	~120
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	~125
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	~133

## Physique 1987

BEDNORZ, J. GEORG, Federal Republic of Germany, IBM Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, \* 1950;  
 MÜLLER, K. ALEXANDER, Switzerland, IBM Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland, \* 1927:

"pour l'importance de la percée de leur découverte de la supraconductivité dans des céramiques. "



J. Georg Bednorz and K. Alex Müller in their laboratory at IBM's Zurich Research Laboratory.

# SCIENTIFIC AMERICAN

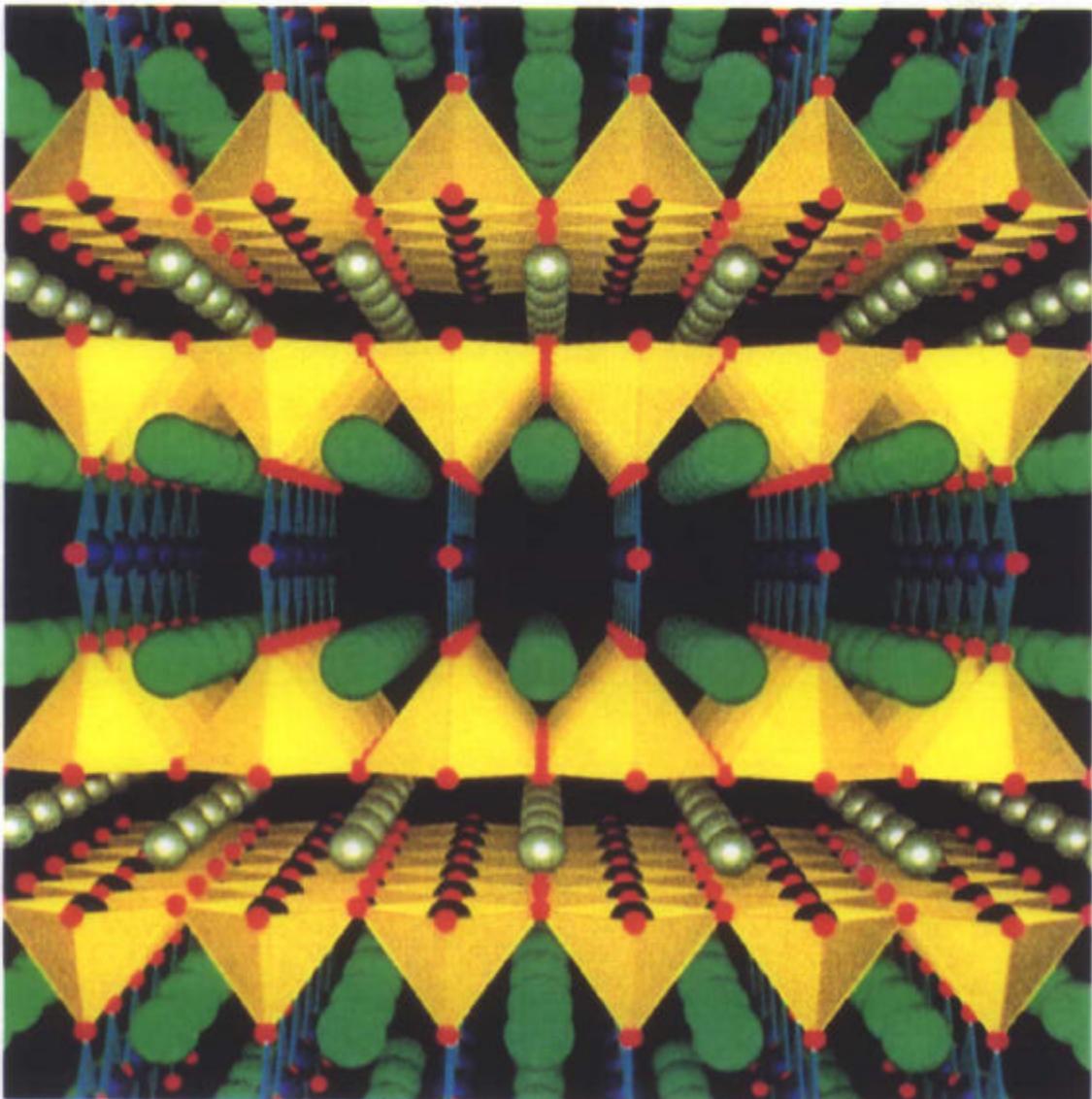
JUNE 1988

\$3.50

*How nonsense is deleted from genetic messages.*

*R for economic growth: aggressive use of new technology.*

*Can particle physics test cosmology?*



*High-Temperature Superconductor belongs to a family of materials that exhibit exotic electronic properties.*

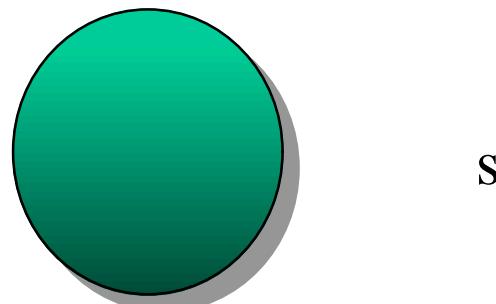
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

92-37

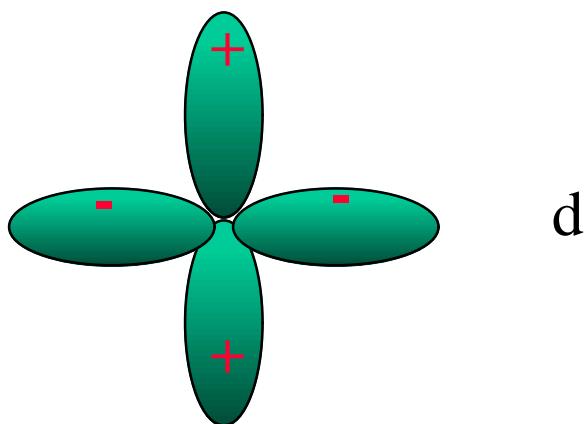
## Le nouveau

- 10 ans plus tard , le mystère plane toujours

- On sait que les paires de Cooper sont dans un état  $d$  plutôt que  $s$

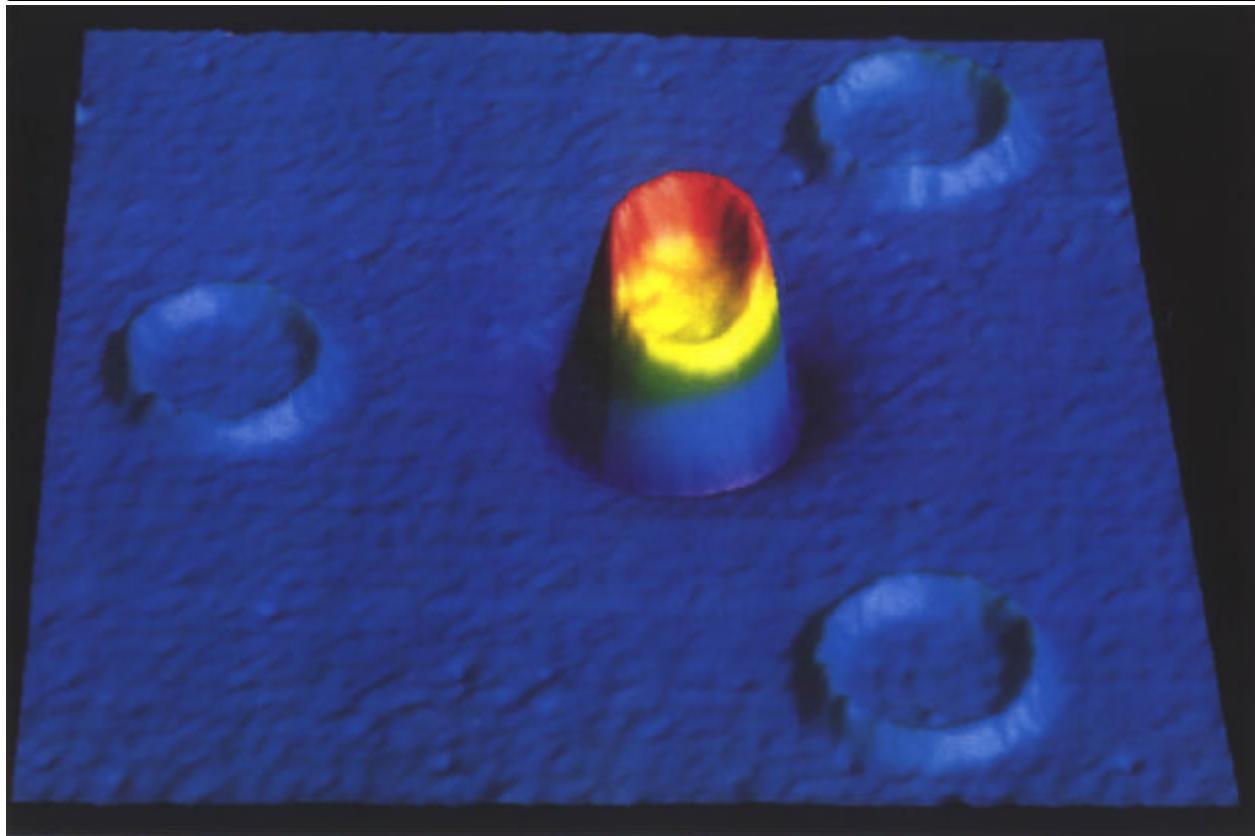


s



d

UBC, 1993...



---

Considérons maintenant la structure atomique de ces composés supraconducteurs: (Le plus célèbre,  $YBa_2Cu_3O_7$  :

Observons les plans  $CuO_2$ , qui peuvent être dopés.

CRPS SHERBROOKE

# SCIENTIFIC AMERICAN

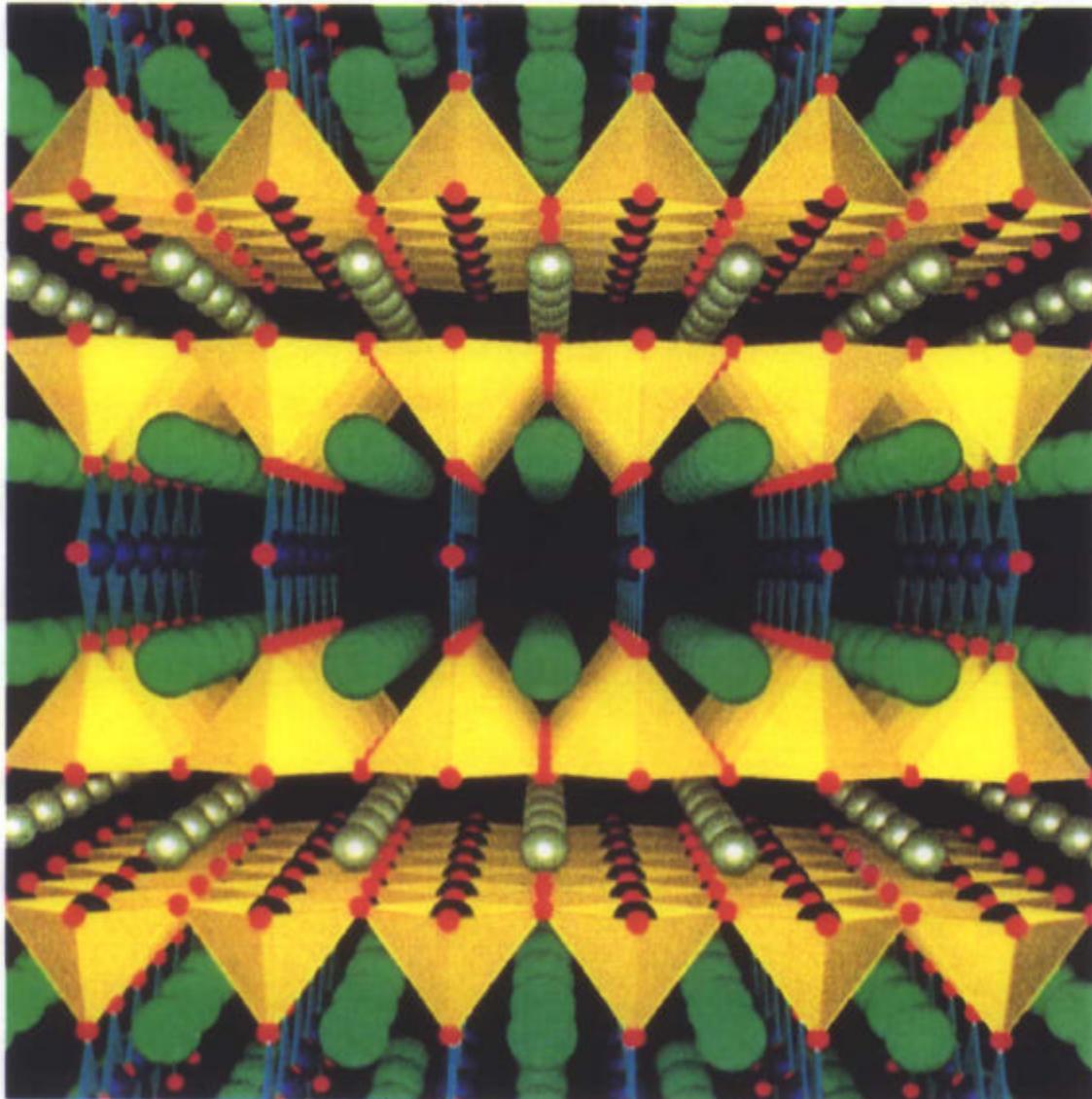
JUNE 1988

\$3.50

*How nonsense is deleted from genetic messages.*

*R<sub>x</sub> for economic growth: aggressive use of new technology.*

*Can particle physics test cosmology?*



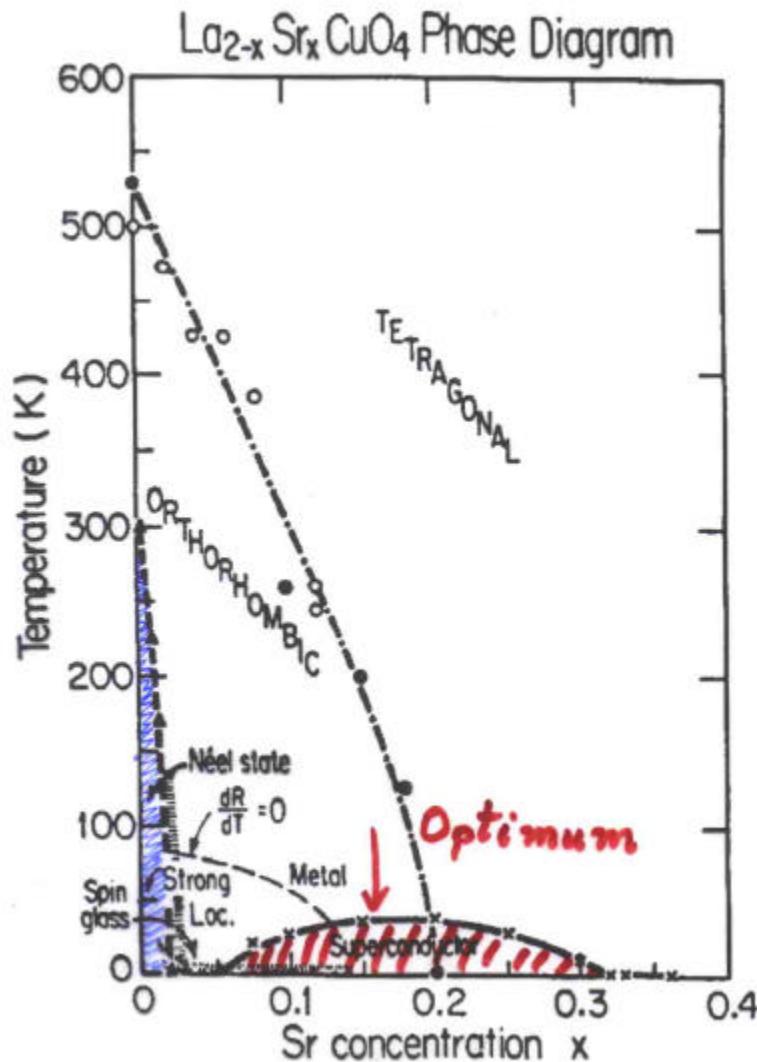
*High-Temperature Superconductor belongs to a family of materials that exhibit exotic electronic properties.*

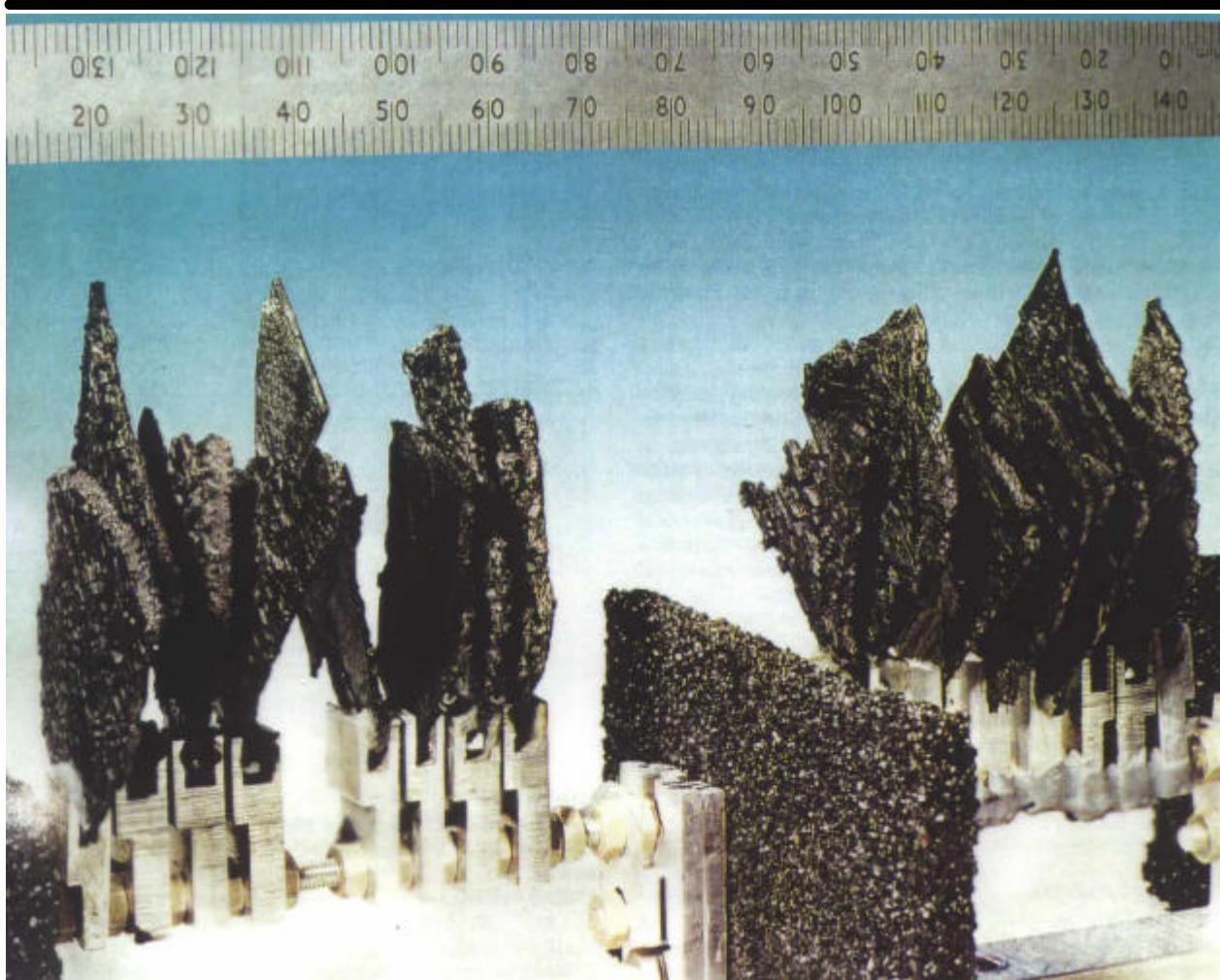
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

92-37

**Problème:** L'état "normal" ( $T > T_c$ ) du  $La_2CuO_4$  (entre autres) ne peut pas être expliqué dans le contexte de la théorie de Drude et d'aucune de ses extensions

La théorie des bandes prédit que ce devrait être un métal mais c'est un isolant antiferromagnétique!





## **Deux grands mystères:**

1. Le composé dopé n'a pas les propriétés d'un métal ordinaire.
2. L'attraction menant à la supraconductivité est sans doute d'origine magnétique plutôt que phononique étant donné la différence d'échelle d'énergie... mais on ne parvient pas à l'expliquer

## Le nouveau

- Les électrons fortement corrélés
- 

Il y a deux limites bien comprises

A) Déplacement d'électrons presque libres (théorie des bandes).

*L'électron est presque libre. Sa masse est modifiée et il acquiert un temps de vie.*

Ce paradigme suffit à expliquer e.g. les semiconducteurs.

B) Électrons totalement localisés (théorie du magnétisme)

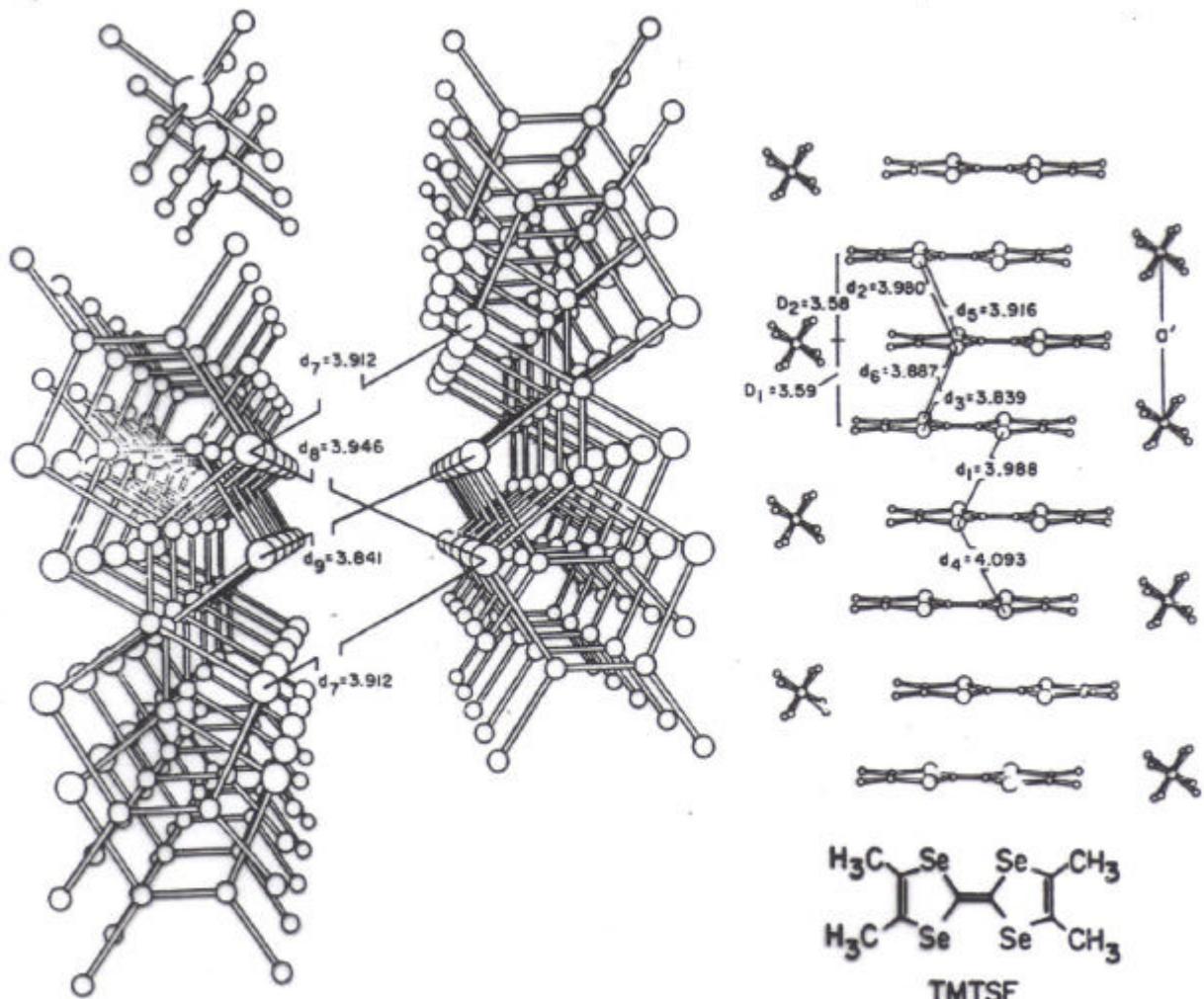
*Il n'y a que le spin de l'électron qui est pertinent*

Suffit à expliquer le magnétisme.

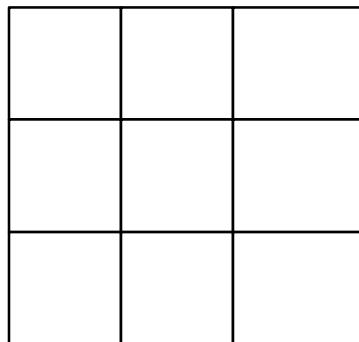
*Que se passe-t-il lorsque nous ne sommes ni dans une limite ni dans l'autre.*

Ce problème n'apparaît pas que dans les supraconducteurs à haute température. Il est commun à plusieurs substances,

- surtout celles ayant une structure tellement anisotrope qu'elles sont quasi unidimensionnelles ou quasi bidimensionnelles.
- e.g. conducteurs organiques



## Modèle prototype: Hubbard



$$\hat{H} = - \sum_{\langle i,j \rangle, s} t_{i,j} (c_{i,s}^+ c_{j,s} + c_{j,s}^+ c_{i,s}) + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow}$$

## Quand l'électron se décompose:

- Par exemple en  $d=1$ , on a déjà prouvé la séparation spin-charge.
- Dans les structures MOSFET en champ magnétique ( $d = 2$ ) l'électron se sépare en parties de charge  $1/3, 1/5 \dots$  (Effet Hall quantique) (*Nobel 98*)
- Dans un supraconducteur, l'électron se décompose en deux parties qui sont chacune une combinaison linéaire de particule et de trou.

## Le nouveau

- Ce qui se passe au confluent des rivières Magog et St-François.
- 

## Conducteurs quasi-unidimensionnels:

- **M. Poirier**, D. Achkir,  
supraconductivité de type  $d$ , nouvelles phases magnétiques, effet des vortex...
- **C. Bourbonnais**, B. Dumoulin, D. Boies, L. Hubert + Orsay (France)  
confirmation de la séparation spin-charge en  $d = 1$ . Généralisation de ces idées pour hauts  $T_c$ . (+Tremblay)
- **L.G. Caron**, S. Moukouri  
nouvelles méthodes numériques pour  $d = 1$ .
- **D. Sénéchal**, D. Allen,  
invariance conforme et chaînes de spin

## Conducteurs quasi-bidimensionnels:

- **S. Jandl**, P. Dufour, + collaboration Stuttgart (Allemagne)  
Sonde spectroscopique des propriétés magnétiques.
- **M. Poirier**, D. Achkir, + ...  
confirmation type *d* pour hauts Tc, par mesures hyperfréquences
- **M. Aubin**, P. Dolez, H. Ghamlouch...  
pertes AC pour câbles Hydro-Québec (Applications SMES)
- **R. Côté** + Indiana, Espagne  
skyrmions et autres phases exotiques.
- **A.-M. Tremblay**, Y. Vilk, L. Chen, D. Boies, A.-M. Daré, P. Bénard, S. Allen, (+ **Sénéchal**, Pairault, + **Bourbonnais**)  
Méthodologie couplages fort et faibles, précurseurs de la supra et de l'antiferromagnétisme dans la phase normale

## **Conclusion**

### **Science et technologie Les inséparables....**

- Machine à vapeur, Watt (1765)
- Thermodynamique, Carnot (1824)
  
- Induction, Faraday (1831)
- Moteur à induction (1880)
  
- Électron, Thomson (1897)
- Télévision (1940...)
  
- Mécanique quantique, (1926)
- Transistor, (1947)
- Révolution informatique, m.-el. (1980)
  
- Laser, (1960)
- CD-ROM (1980-90)

- Supraconductivité (1911)
- Imagerie médicale (1980-90)
- Microélectronique à Sherbrooke....

## Référence sur la découverte:

*"The path of no resistance: The story of the revolution in Superconductivity"*

Bruce Schechter  
(Simon and Schuster, NY 1989)

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{I}{\pi t} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$