

# Superconductors



מציגה: פאדיה חטיב  
תוכנית רוטשילד-ויצמן  
מכון ויצמן למדע  
בהנחיית: פרופ' רשף טנא  
ודר' רון בלונדר

שם הקורס: Introduction to materials and nanotechnology

<http://www.fys.uio.no/super/levitation/apart.mpeg>



שדה מגנטי של 16 טסלות גורם לצפרדע חיה לרחף באוויר



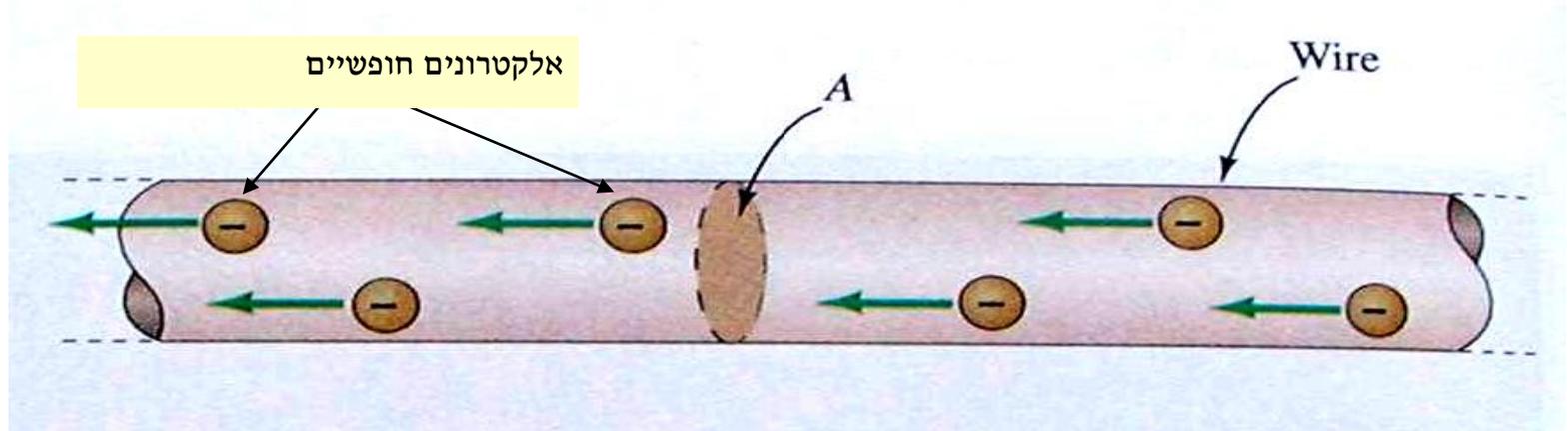
## מהלך ההרצאה:

- הגדרות בנושא מוליכות
- הקדמה היסטורית של תחום מוליכי-העל
- מטרות
- עקרונות כימיים ופיסיקליים
- שמושים ויישומים
- סיכום – מבט לעתיד

# זרם חשמלי ומוליכות חשמלית

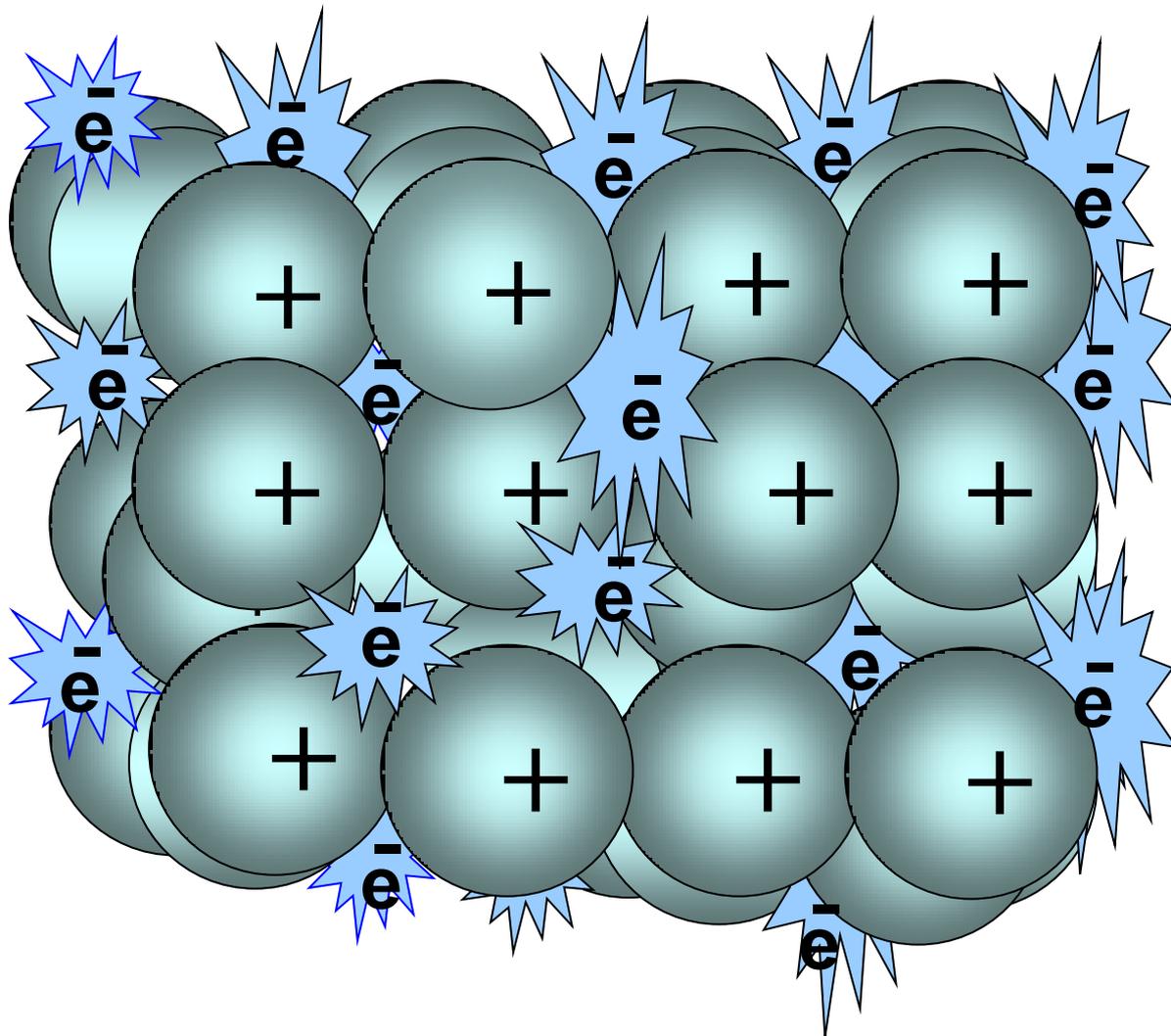
**זרם חשמלי** היא תנועה מכוונת של נשאי מטען חופשיים בתוך חומר מוליך.

במתכות, זוהי תנועה מכוונת של אלקטרונים חופשיים



תמונה מיקרוסקופית של תיל מוליך דרכו זרם חשמלי מאלקטרונים חופשיים

# סריג מתכתי, יונים חיוביים, אלקטרונים חופשיים...

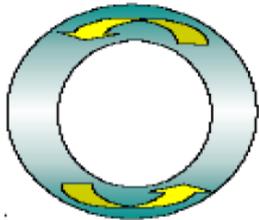
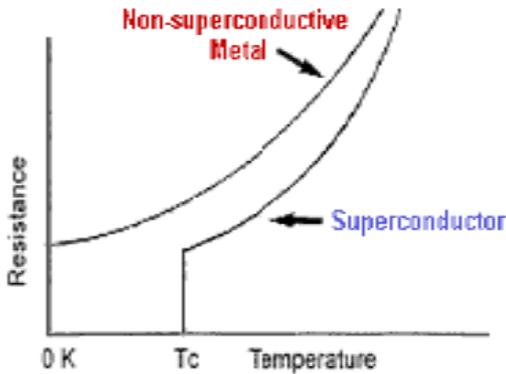


# מוליכות חשמלית והתנגדות

- מוליכותו החשמלית של גוף מסוים היא מידת היכולת של זרם חשמלי לעבור באותו גוף.
- בתייל בו זורם זרם חשמלי, קיימת התנגדות למעבר האלקטרונים. ההתנגדות היא גודל הופכי למוליכות חשמלית.
- מקור ההתנגדות של תיל למעבר זרם חשמלי היא בעיוות של היונים החיוביים. העיוות נגרם כתוצאה מהתנגשויות של גלי האלקטרונים החופשיים שנמצאים בפאזות שונות עם היונים הנמצאים בחומר המוליך.
- ככל שטמפרטורת התיל גבוהה יותר, כך תנודות היונים בתיל גוברות, ולכן ההתנגדות למעבר האלקטרונים עולה.
- בטמפרטורות נמוכות תנודותיהם של יונים בתיל יורדת, לכן גם ההתנגדות יורדת.
- ההתנגדות אינה רצויה מכיוון שיוצרת הפסדים באנרגיה.



# מוליכי-על



- **מוליכות-על** היא יכולת של חומרים מסויימים להוליך זרם חשמלי ללא כל התנגדות. מתחת לטמפרטורה הקריטית זרם חשמלי (electric current) יכול לזרום עד אינסוף בתוך ה-Loop של העל-מוליך וגם שטף של שדה מגנטי חיצוני (expulsion Magnetic flux) יכול להווצר

- **טמפרטורה קריטית (Tc)** זאת הטמפרטורה שמתחת לה "נעלמת" ההתנגדות במוליך והוא הופך להיות **על-מוליך**

- על-מוליכים יכולים לשאת כמות גדולה פי 100 זרם חשמלי בהשוואה לכבלי נחושת ואלומיניום רגילים באותו גודל.
- הדבר נובע מכך שההתנגדות שלהם אפסית- מתח קטן יגרום לזרם גדול מאוד, על פי

$$R=V/I : \text{חוק אוהם}$$



# קצת היסטוריה...

## The Discovery of Superconductivity 1911

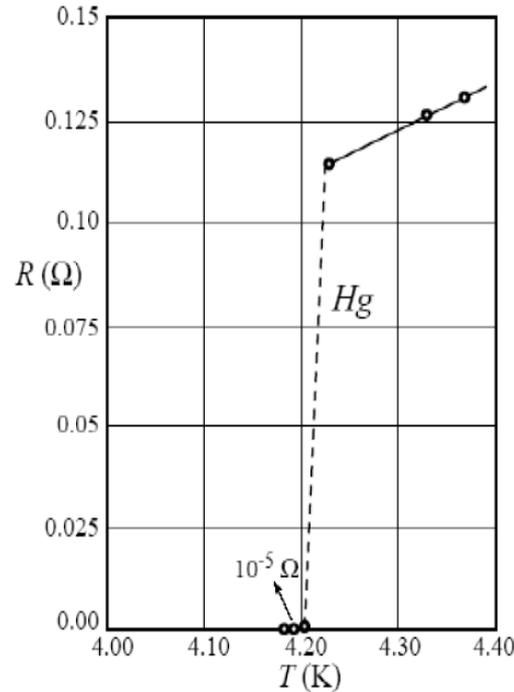
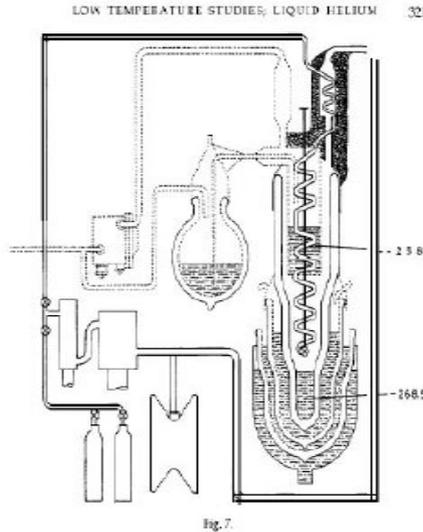


### The Nobel Prize in Physics 1913

"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium-



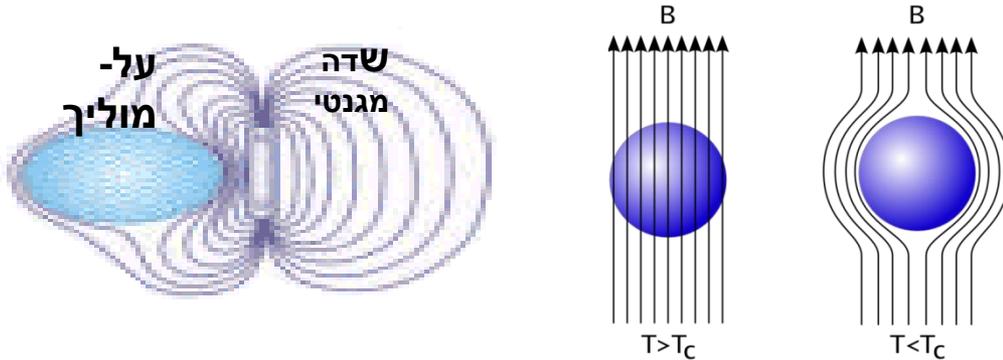
Heike Kamerlingh Onnes  
the Netherlands  
Leiden University  
Leiden, the Netherlands



תופעת מוליכות-העל  
נצפתה לראשונה  
**בשנת 1911** ע"י  
הפיזיקאי ההולנדי  
**Heike Kamerling**  
מאוברסיטת ליידן  
כאשר הוא קירר **כספית**  
לטמפרטורה של  
הליום נוזלי (4.2K),  
הוא גילה כי  
התנגדות החומר  
נעלמה כלא הייתה.  
ובשנת **1913** הוא קבל  
פרס נובל

# קצת היסטוריה...

- לאחר מכן בשנת 1933 Meissner גילה שמוליכי-על דוחים שדה מגנטי שבתוכם, (Meissner effect)



- התאוריה של מוליכות העל נוסחה באופן מדעי בשנת 1957 ע"י שלושה פיסיקאים אמריקאים:  
BARDEEN , COOPER , SCHRIEFFER  
ונקראה על שמם BCS



# קצת היסטוריה...



Brian Josephson

• בשנת 1962 התגלה החוט המסחרי הראשון של מוליכי-על שמורכב מסגסוגת של titanium-niobium ובאותה שנה Josephson ניבא תיאוריה חדשה: זרם-על יכול לרחף בין שני מוליכי-על שמופרדים באמצעות חומר מבודד (Josephson effect) וקיבל על זה פרס נובל בשנת 1973.



## The Nobel Prize in Physics 1987

for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials-



J. Georg Bednorz  
1/2 of the prize  
Federal Republic of Germany  
IBM Zurich Research Laboratory  
Rueschlikon, Switzerland  
b. 1950

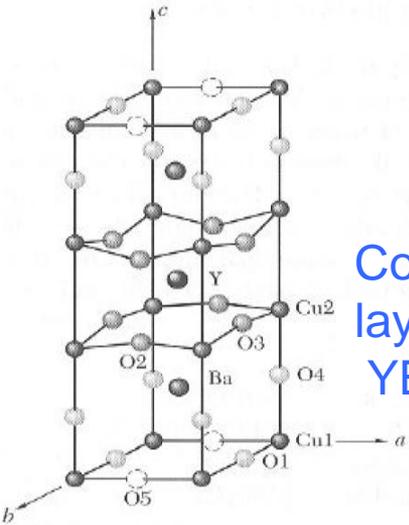


K. Alexander Müller  
1/2 of the prize  
Switzerland  
IBM Zurich Research Laboratory  
Rueschlikon, Switzerland  
b. 1927

• פריצת דרך נוספת בתחום מוליכות העל הייתה בשנת 1986 כאשר שני חוקרים משוויץ בנו **הרכב קירמי שביר**  $\text{LaBaCuO}$  בעל מבנה ששייך למשפחת perovskite material אשר התנהג כמוליך-על ב-  $T_c=35\text{K}$  הגבוהה ביותר שהתגלה עד אז. ועל כך זכו בפרס נובל בפיסיקה בשנת 1987

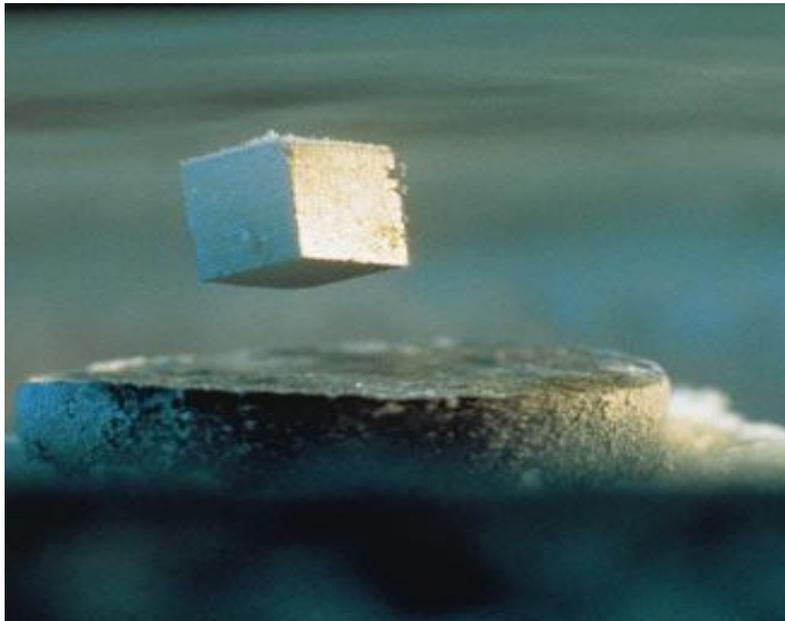
# ועוד קצת היסטוריה...

Copper oxide  
layers in  
YBCO



החל משלב זה החוקרים התחילו  
לחפש דרכים להעלות את  
הטמפרטורה קריטית ( $T_c$ ) של  
מוליך העל.

בשנת 1987 נמצא ע"י חוקרים  
מאוניברסיטת אלבאמה  
חומר הידוע היום כ-YBCO  
אשר  $T_c$  שלו הגיעה  
ל-90K



magnet rides above an yttrium-based  
Superconductor

# בעידן החדש.....

**בשנת 2001 פרופ רייך ממכון ויצמן ביחד עם תלמידו יצחק צבע** גילו שתחמוצת הטונגסטון המכילה עקבות של נתרן גילתה מוליכות על בטמפ' של 91K בתגלית זו עברו לעידן הברונזה (בעל המוליכים) כך שמשפחת חומרים אלה כונתה "ברונזה של טונגסטון"

**בשנת 2006 התגלה חומר שהוא ממשפחת הקופרטים (מכיל נחושת)**  
mercury thallium barium calcium copper oxide ( $\text{Hg}_{12}\text{Tl}_{13}\text{Ba}_{30}\text{Ca}_{30}\text{Cu}_{45}\text{O}_{125}$ )  
Tc=138 K

**לאחרונה דווח על מוליך על בטמפרטורה גבוהה ראשון מסוגו שהוא לא מבוסס במבנהו** על קופרטים אלא על ברזל (LaOFeAs) Tc=26K .



# מטרות

1. גילוי מוליכי-על בטמפרטורה גבוהה.
2. גילוי מוליכי על בעלי זרם חשמלי קריטי גבוהה ושדה מגנטי קריטי גבוהה.
3. הבנת תיאוריית מנגנון העל-מוליכות בטמפרטורה גבוהה.
4. פיתוח טכנולוגיות שיאפשרו להשתמש במוליכי-על בחיי היומיום .

פחות התנגדות = חסכון באנרגיה, צמצום נזקים לסביבה  
ובטווח הארוך העלאת רמת החיים.

# מיון מוליכי-העל

- לפי התכונות הפיסיקליות: Type I, Type II
- לפי התיאוריה המסבירה אותם: קונבנציונאליים או לא קונבנציונאליים.
- לפי הטמפרטורה הקריטית שלהם: מוליכי-על גבוהי טמפרטורה (HTS) (אם מקררים אותם בחנקן נוזלי  $T_c > 77K$ ) או מוליכי-על נמוכי טמפרטורה (אם מקררים בטכנולוגיה אחרת מתחת לטמפרטורה הקריטית שלהם).
- לפי סוג החומר:
  - יסודות כימיים (כספית, עופרת).
  - סגסוגות alloys (niobium-titanium , germanium-niobium)
  - קירמים (YBCO או מגניזיום די ברומיד)
  - אורגנים (carbon nanotubes ; fullerenes)

# KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE  
 ■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

|   |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1 | IA |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | H  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | IIA |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | He  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 | Li |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Be  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | B   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | C  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | N  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | O   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | F   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ne  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 | Na |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Mg  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Al  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Si |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | P  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | S   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Cl  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ar  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 | K  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ca  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Sc  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ti |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | V  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Cr  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Mn  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Fe  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Co  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ni  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Cu  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Zn  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ga |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ge |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | As |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Se |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Br |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Kr |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 | Rb |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Sr  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Y   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Zr |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Nb |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Mo  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Tc  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ru  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Rh  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Pd  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ag  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Cd  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | In |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Sn |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Sb |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Te |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | I  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Xe |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 | Cs |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ba  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | *La |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Hf |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ta |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | W   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Re  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Os  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ir  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Pt  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Au  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Hg  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Tl |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Pb |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Bi |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Po |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | At |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Rn |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7 | Fr |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ra  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | +Ac |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Rf |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Ha |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 106 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 107 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 108 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 109 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 110 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 111 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 112 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

*SUPERCONDUCTORS.ORG*

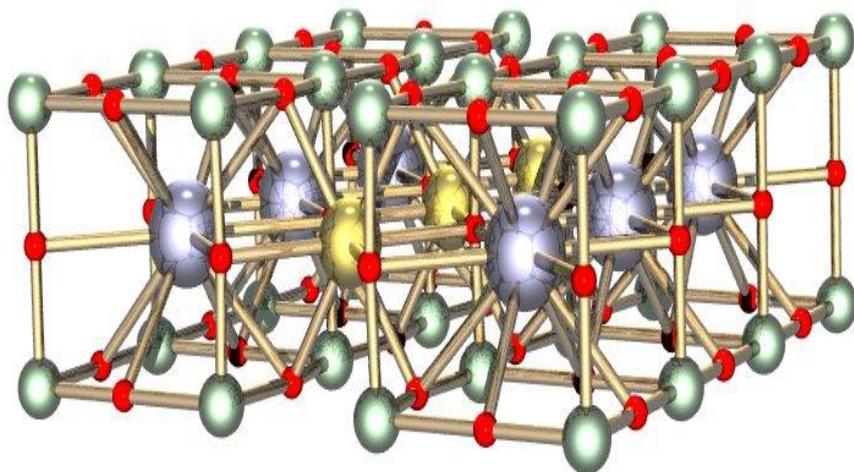
\* Lanthanide Series

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |

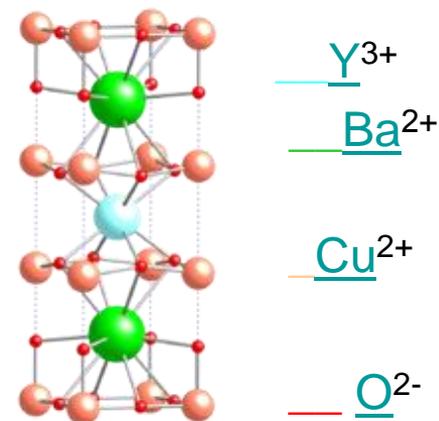
+ Actinide Series

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm  | Md  | No  | Lr  |

# מוליכי-על קירמיים



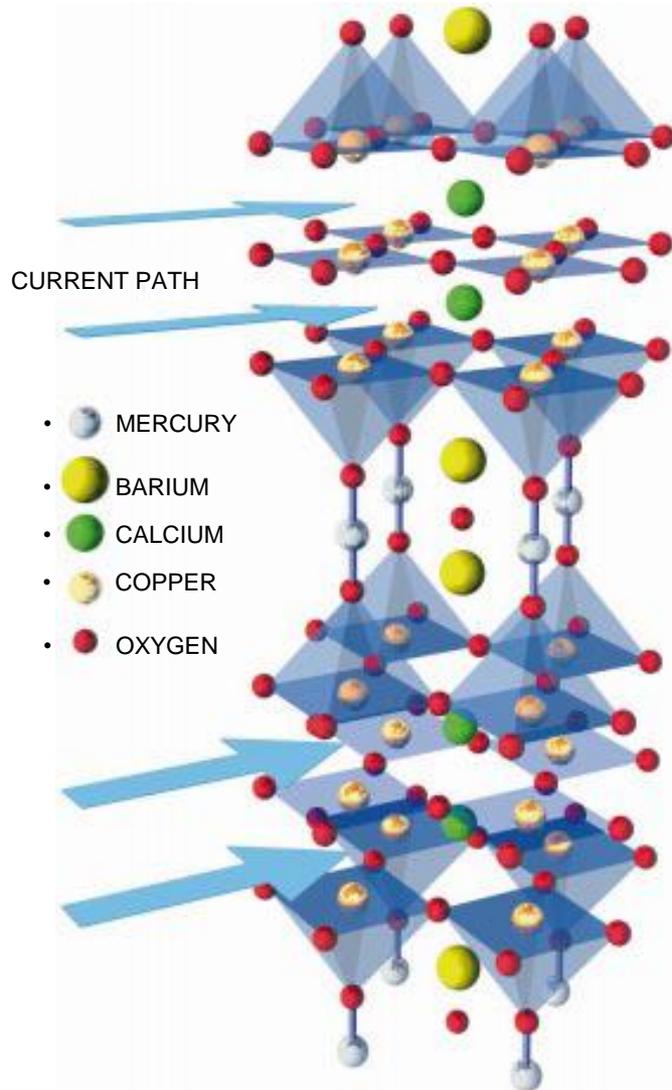
Yttrium barium copper oxide (YBCO)



ויקיפדיה בשפה הגרמנית



הם נחשבים קריסטלים רב שכבתיים פעילותם מתרחשת בין אטומי הנחושת והחמצן הדחוסים בתוך "סנדביץ" של Barium ו-Yttrium במקרה של YBCO, לכן צריך להגן עליהם מספיגת לחות. מוליכות-על בטמפרטורה גבוהה נוצרת מחורים (חלקיקי מטען חשמלי חיובי) החורים מתאספים ויוצרים רצועות ניידות של מטען.



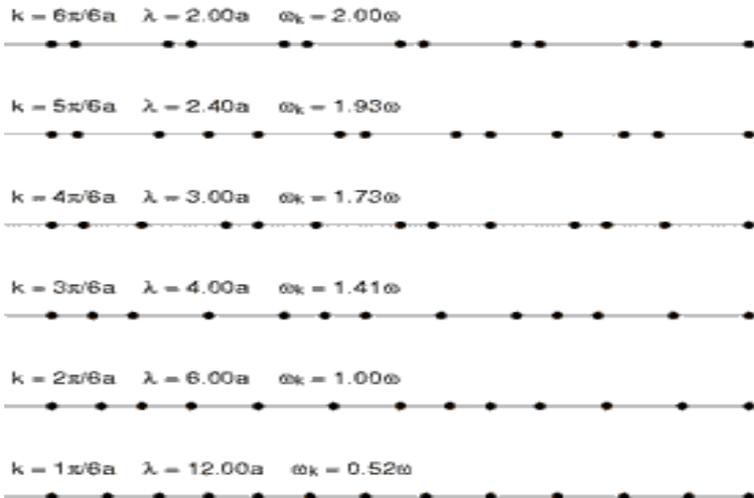
HIGHWAYS FOR ELECTRONS are located between planes of copper and oxygen atoms, as shown in this representation of a **mercury barium calcium copper oxide**, which loses its electrical resistance at 134 K-among the highest of the high-temperature superconductors

# תיאוריית BCS

נקראת על שם מפתחיה: **בארדין קופר ושריפר** (שזכו בפרס נובל על עבודה זו), שתיארה את הולכת העל הקונבינציונאלית בצורה מלאה ומקיפה.

לפי התיאוריה, הולכת-העל מתבצעת על ידי צמדי אלקטרונים, המכונים "צמדי קופר (Cooper pairs)", אשר אינם מבצעים אינטראקציה עם החומר ונעים ללא הפרעה למרות הדחייה האלקטרוסטטית הקולומבית שצריכה להיות ביניהם בגלל המטענים השליליים. האלקטרונים נמשכים זה לזה ויוצרים זוג קשור וזה באמצעות:

1. חסימת חלק מהמטען השלילי - אפקט מיסוך (Screening) וזה נובע מתנועתם של אלקטרונים אחרים.



2. חילופי פונונים - משאיר את האלקטרונים צמודים פונון (קול ביוונית): אופן תנודה מקוונטט שמתרחש כאשר חלקים בגביש מתנודדים באותה תדירות. אלה אינטראקציות חלשות באנרגיה.

# תיאוריית BCS



wikipedia

- אינטראקציה המשיכה של חילופי הפונונים יכולה להתגבר על הדחייה האלקטרוסטטית בטמפרטורות מספיק נמוכות. כך שבטמפרטורות נמוכות אנו מקבלים הרבה זוגות אלקטרונים, דבר המאפשר הולכה ללא התנגדות.

- אומנם תאוריה זו הסבירה את התנהגותם של יסודות ותרבות פשוטות כמוליכי-על בטמפרטורות מאוד קרובות לאפס המוחלט. אבל בתרבות יותר מסובכות וטמפרטורות גבוהות יותר (של החנקן הנוזלי) התאוריה לא הייתה טובה מספיק כדי להסביר את תופעת העל-מוליכות במלואה.

# שימושים של מוליכי-על

אחד השימושים בהם מצטיינים מוליכי-העל הינו

**"הרמה מגנטית" Magnetic levitation**

כלי רכב כדוגמת רכבות יכולים "לרחף" בעזרת מגנטים חזקים של מוליכי-על, ובכך להקטין בצורה משמעותית את החיכוך בינם לבין הפסים.

מוליכי-העל עומדים במשימה בצורה הרבה יותר טובה, זולה ואיכותית מאשר אלקטרומגנטים רגילים. ע"י שימוש בטכנולוגיה זו, הרכבת יכולה להגיע למהירויות אשר היו לכאורה בלתי הגיוניות עד להמצאת הטכנולוגיה.

- בתמונה שלהלן נראית רכבת ביפן, אשר מגיעה למהירות של **343 מיילים לשעה!**



The Yamanashi MLX01 MagLev train



# שימושים של מוליכי-על

שימוש נוסף למוליכי-העל הוא בתחום הרפואה (ביומגנטיות).

**MRI - Magnetic Resonance Imager** - סורק תהודה מגנטית.

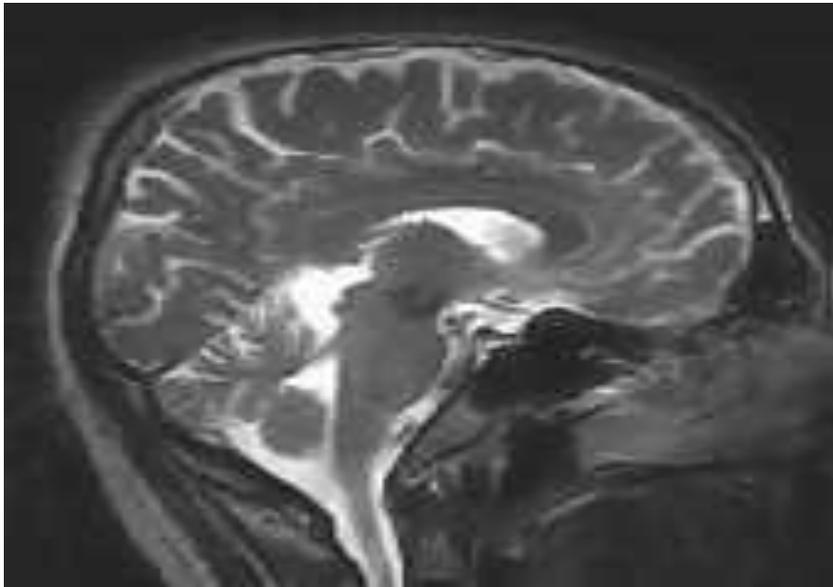
שדה מגנטי חזק (שנוצר ע"י הזרם במוליך-על) מופעל על גוף האדם; במולקולות המים והשומן נוצרות עקב כך רמות אנרגיה שהפרש והרוחב שלהן ניתן למדוד באמצעות גלים אלקטרומגנטיים.

באופן זה, ניתן ליצור במחשב הדמיה של גוף האדם "מבפנים". זאת שיטה הרבה יותר יעילה ושימושית מצילומי רנטגן רגילים.

שיטת בדיקה זו נקראת **MRI**

\*שמושיים במכשירי NMR

\*Masspectrometers



• MRI של גולגולת האדם

# שימושים של מוליכי-על

שימוש אחר של מוליכי-על הוא **במחוללי זרם חשמלי (Generators)**. מחולל הבנוי עם חוטים שהם **מוליכי-על** נצילותו מגיעה עד לכ- 99%, כאשר גודלו כמחצית, מגודלו של מחולל רגיל. כמו כן החל שימוש **בשנאים (Electricity transformers)** הבנויים ממוליכי-על ובמתקני כוח חשמלי אחרים, שמסוגלים לאגור אנרגיה חשמלית בכמויות גדולות, לשימוש בשעת חירום.



# שימושים של מוליכי-על

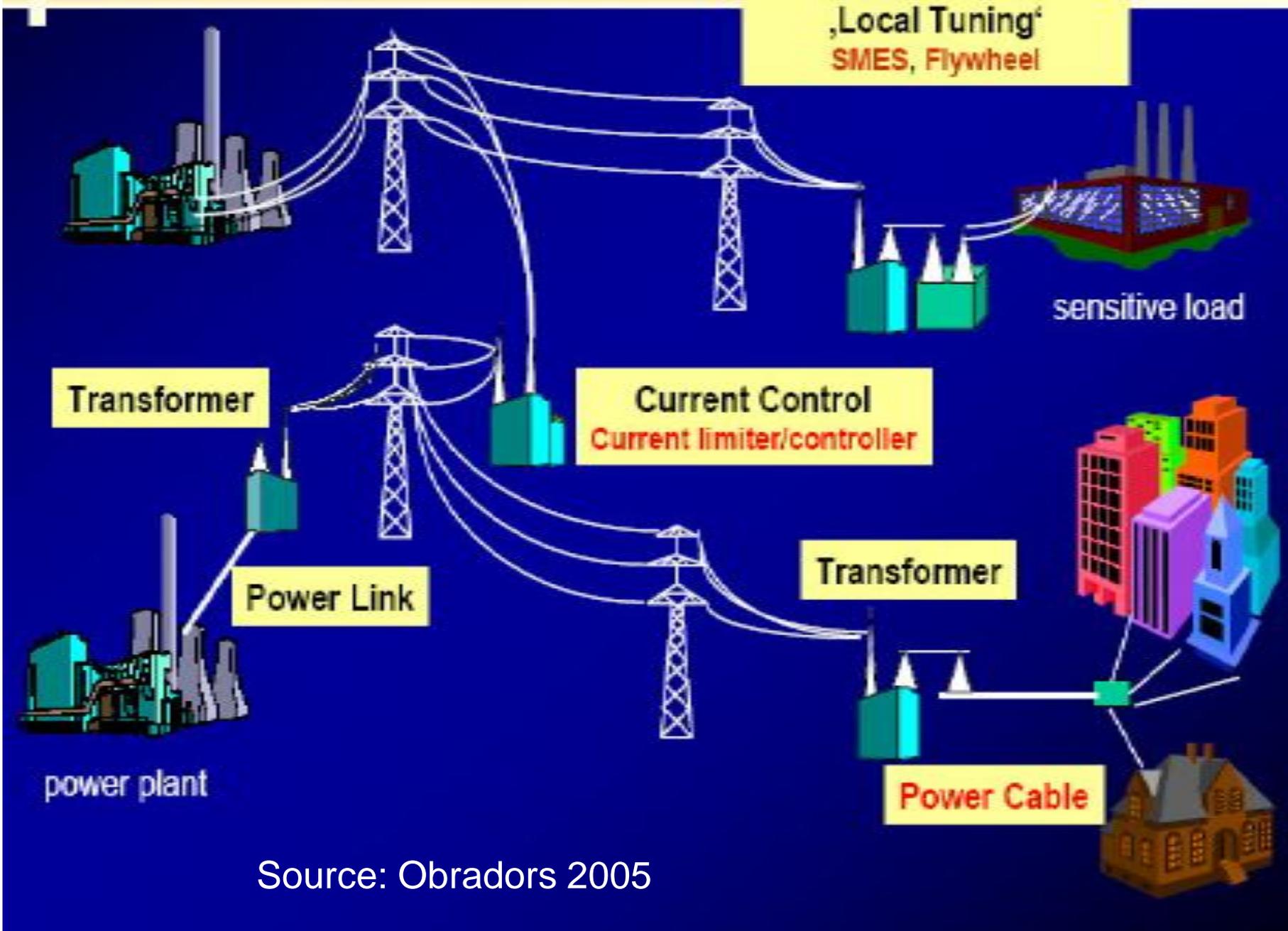
## כבלים שימושיים העשויים ממוליכי-על

**המכשול** היה בהתחלה השימוש בחומרים קרמיים שהם שבירים. **הפתרון** היה למקם גרגרים קטנים של החומר המוליך בתוך גליל מכסף בקוטר של כרבע דיאמטר. הגלילים יומתחו לחוטים דקים ויוחדרו לגליל כסף נוסף הגליל ישוטח כדי לייצר רצועה של החומר מוליך-העל. רצועה זו תהיה גמישה באופן סביר אך לא גמישה כמו רצועת נחושת.

באמצעות כבלים דקים יותר, ניתן להעביר זרם זהה לכבל נחושת.



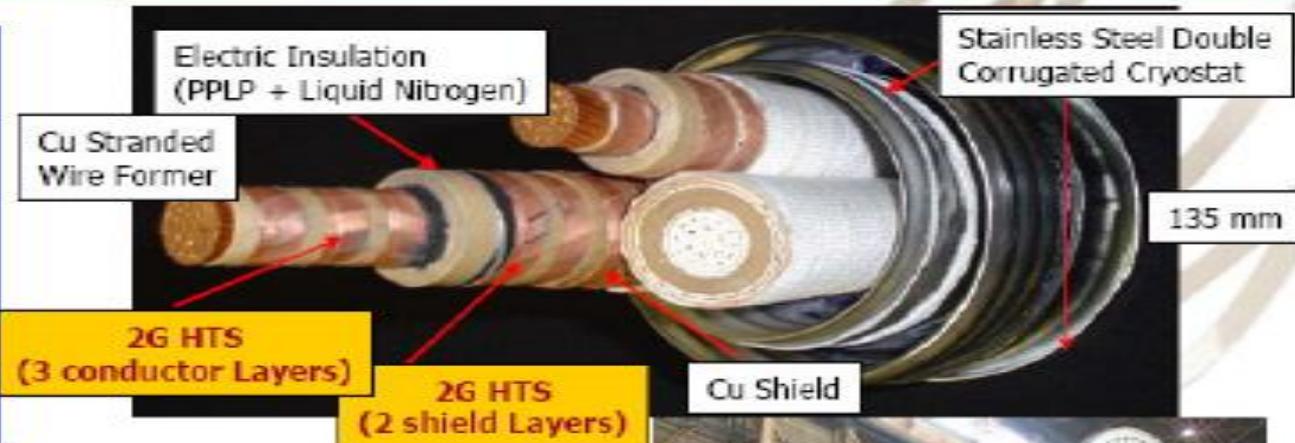
**HIGH CAPACITY:** Three strands of American Superconductor's flattened wire carry as much current as a 400-ampere copper cable does.



# Example BSCCO/YBCO cable in US

A 30 m 2G cable, incorporating ~10,000 m of SuperPower 2G wire, manufactured and tested by Sumitomo

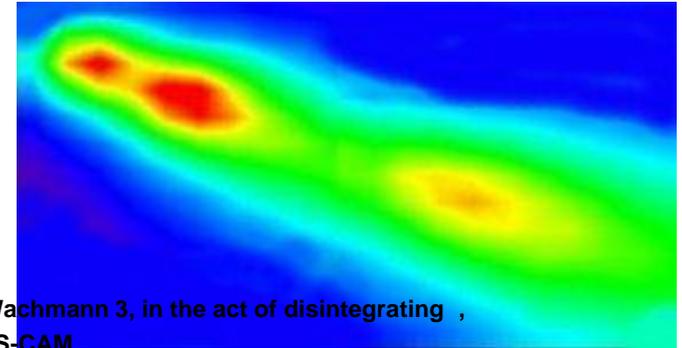
Nearly 10,000 m of 2G wire in 43 m piece lengths and minimum  $I_c > 70A$  was delivered by SuperPower in Dec. 2006, marking the single largest delivery of 2G wire



# שימושים נוספים

Superconducting X-ray detectors

superconducting light detectors called the S-Cam



A photo of Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3, in the act of disintegrating , taken with the European Space Agency S-CAM.

superconducting digital router

reduction of green-house gas (GHG) emissions

מוליכי-על הינם שימושיים לבניית Josephson junction. זוהי אבן הבניין של ה-  
SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)  
משתמשים בהם במיקרוסקופים של סריקה והם מגנטים מאד רגישים.

פילטרים של מכשירים אל-חוטניים

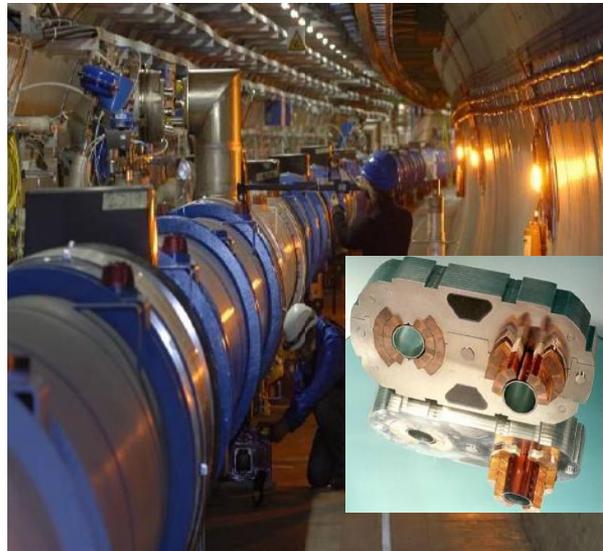
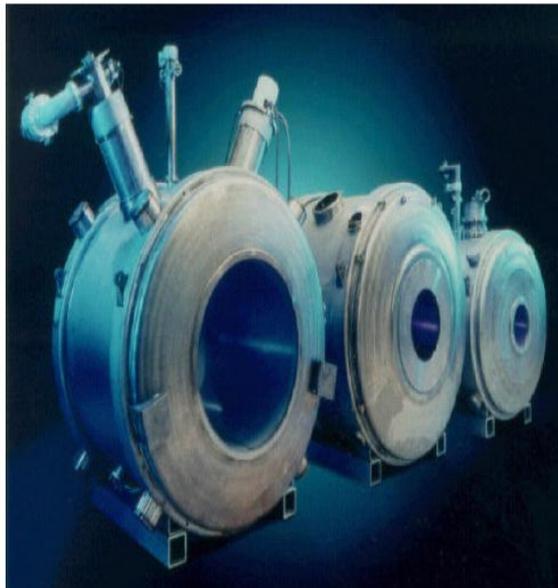
פילטרים מוליכי-על הרבה יותר סלקטיביים בהעדר התנגדות ופחות סיגנלים הולכים לאיבוד  
וזה מגדיל את טווח הקליטה שלהם

MRI: the patients view

Magnets for industrial separation

Various magnets for LHC and ITER

photo courtesy of SIEMENS



Oxford Instruments HGMS magnets 5T/1000, 5T/460, 5T/360

## Power (large scale) application of superconductors



|                           |
|---------------------------|
| <b>TOSANOUMI</b>          |
| (Sumo Wrestler)           |
| Height of Tosanoumi 185cm |
| Weight of Tosanoumi 142kg |
| Weight of disk 80kg       |
| Total weight 202kg        |

# References

1. J. Smit & O. Chevtchenko, (2007). Superconductivity , from a Dutch invention into world wide activities in.
2. J. R. Kirtley, & C. C. Tsuei, (1996). Probing High-Temperature Superconductivity *Recent experiments exploiting subtle quantum effects yield important clues about why some ceramics conduct electricity without resistance, Journal of Scientific American, 68-73.*
3. Q. CHOI ,(2008).A high-temperature superconductor based on iron
4. C. W. Chu ,(1995).High-Temperature Superconductors *They conduct current without resistance more cheaply than conventional superconductors can and are slowly finding their way to widespread use, Journal of Scientific American, 162-165.*
5. S. Bruce, (2000). ENGINEERING\_SUPERCONDUCTIVITY *No Resistance High-temperature superconductors start finding real-world uses, 31-33*
6. C.C. Tsuei et al., (1997). Nature 387, 481

7. Peterson,(1996) Electron Pairs and Waves: Tackling the Puzzle of High-Temperature Superconductivity. Ivars in *Science News*, Vol. 149, No. 10, pages 156–157;
8. <http://www.ias.ac.in/resonance/Sept2003/pdf/Sept2003p41-48.pdf>
9. L. Barbara,(1996). Experiments Probe the Wavefunction of Electron Pairs in High- $T_c$  Superconductors.,in *Physics Today*, Vol. 49, No. 1, pages 19–22.
10. D. J. Scalapino,(1995).The Case for  $dx_2y_2$  Pairing in the Cuprate Superconductors. in *Physics Reports*, Vol. 250, No. 6, pages 329–365.
11. F. Tim,(1995). Call Them Irresistible. in *Discover*, Vol. 16, No. 9, pages 83–91.
12. J. R. Kirtley, M. B. Ketchen, C. C. Tsuei, J. Z. Sun, W. J. Gallagher, Lock-See Yu-Jahnes, A. Gupta, K. G.Stawiasz and S. J. Wind,(1995). Design and Applications of a Scanning SQUID Microscope. in *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 39, No. 6, pages 655–668.
13. K.A. Muller, J.G. Bednortz, (1987). *Science*, Vol. 237,3311
14. המכון,חדשות מדע,גליון מספר 22,מארכ 2001,מתקדמים לעידן הברונזה.

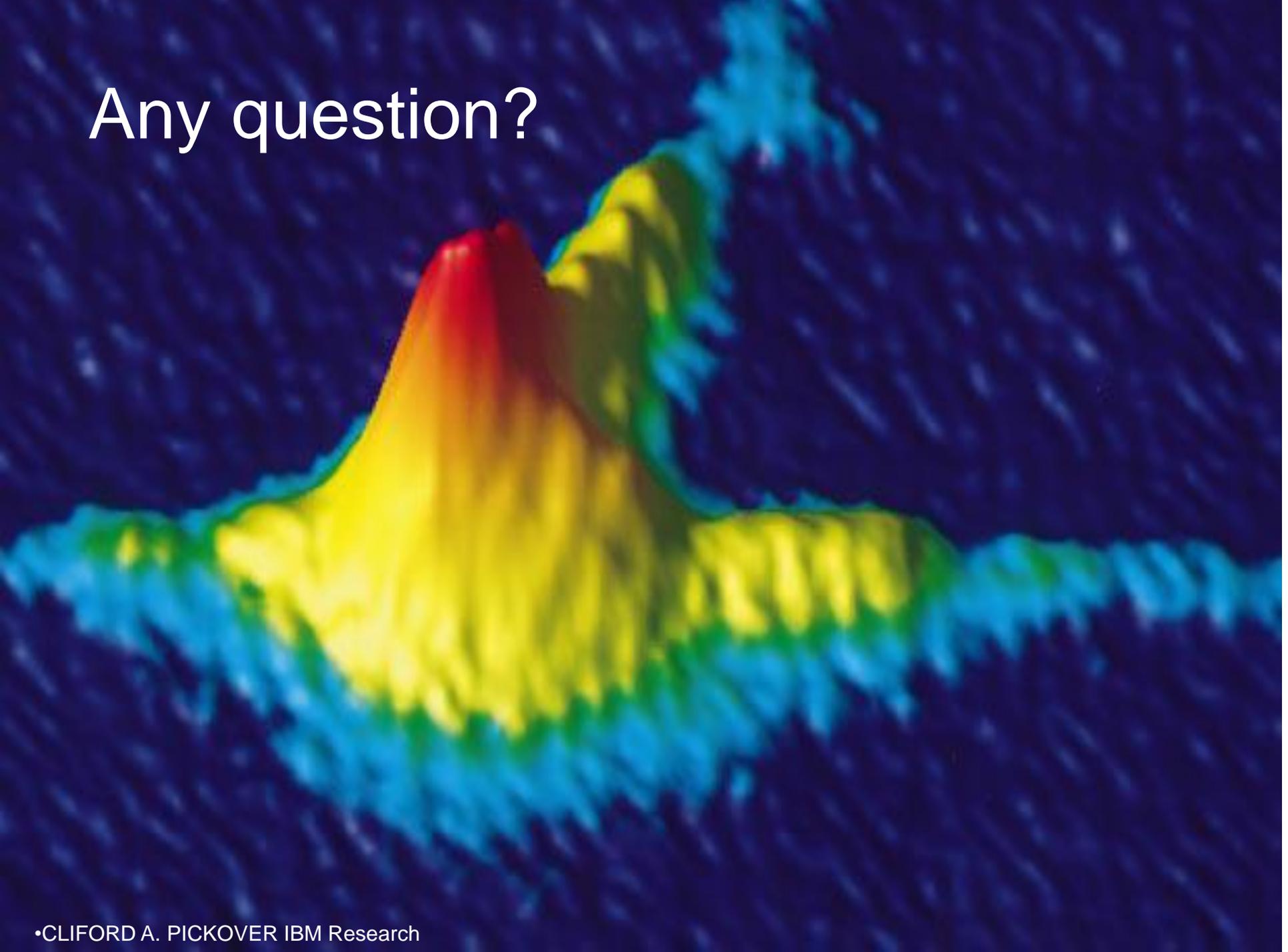
15. J.R.Kirtley et al,(2006). Nat.Phys.**2**,190.

16.J.R.Kirtley. Et al,(1995).Nature **373**,225.

17. The First 200K Superconductor.<http://superconductors.org/200K.htm>.

18. J.G.Bednorz & K.A. Muller (1986).”Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”.Z.Physik,*B* **64**  
(1):189-193

Any question?





Thank you

