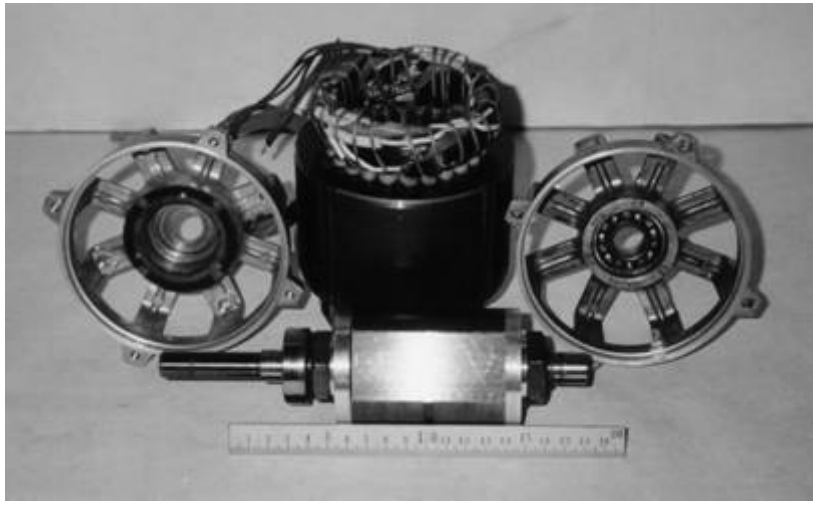
Высокотемпературная сверхпроводимость.

Опыты по левитации человеческих существ в лаборатории сверхпроводимости (Superconductivity Research Laboratory, ISTEC, Токио, Япония)

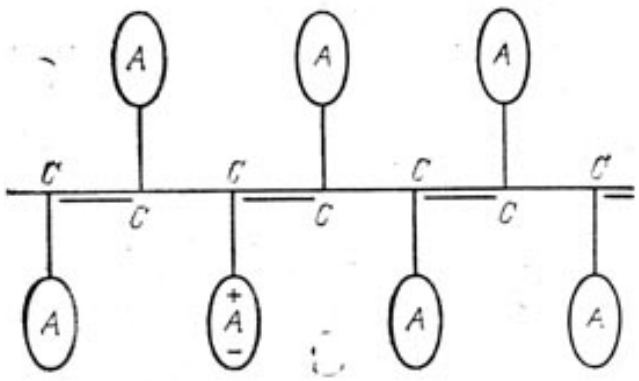


ВТСП двигатель 3 кВт (50 Гц)

В базе данных по высокотемпературной сверхпроводимости http://perst.isssph.kiae.ru/Base/searchform.asp?db=Super имеется ссылки на более 75 тысяч публикаций.

Мечты о высокотемпературной сверхпроводимости.

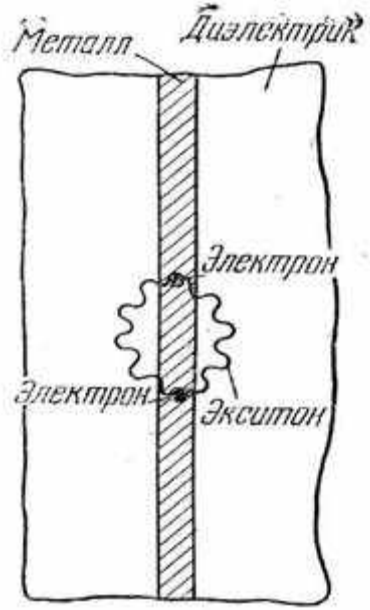
В 1950 году Ф. Лондон высказал предположение о возможности сверхпроводимости в органических макромолекулах. F. London, Superfluids, v.1, John Wiley, N. Y., 1950.
Проанализировав эту идею на основе теории БКШ В.А. Литтле пришел к выводу о возможности сверхпроводимости при комнатной температуре. W. A. Little, «Possibility of Synthesizing an Organic Superconductor», Phys. Rev. 134, A1416 - A1424 (1964).



Структура в которой по мнению Литтла возможна высокотемпературная сверхпроводимость

Литтле предложил фактически экситонный механизм сверхпроводимости в одномерных системах. В том же году В.Л. Гинзбург ЖЭТФ 47, 2318 (1964) предложил экситонный механизм сверхпроводимости в двумерных системах.
Фононный механизм сверхпроводимости $T_c \leq 30 \div 40$ К. До 1986 г. max $T_c = 23.2$ К (Nb_3Ge).
Формула Макмиллана, W. L. McMillan, Phys. Rev. 167, 331 - 344 (1968)

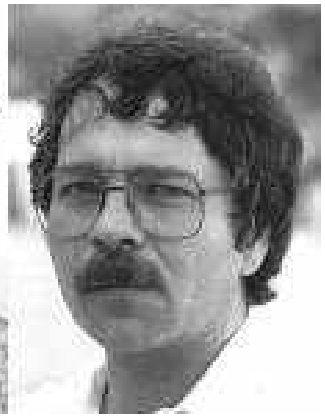
$$T_c = \frac{\Theta_D}{1.45}\exp\left(-\frac{1.04(1+l)}{l - m^*(1+0.62l)}\right)$$



Сэндвич диэлектрик-металл-диэлектрик в котором по мнению В.Л. Гинзбурга возможна высокотемпературная сверхпроводимость

В.Л. Гинзбург, Д.А. Киржниц и др. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Изд. «Наука» М. 1977.
«Ближайшее десятилетие, как можно думать, явится решающим для проблемы высокотемпературной сверхпроводимости.»
А.А. Абрикосов, Основы теории металлов. Изд. «Наука» М. 1987.
Раздел 16.11: Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Идеи Литтла и Гинзбурга, металлический водород, «металлический экситоний» и пр.

Неожиданное осуществление мечты.



Алекс Мюллер 1927

Георг Беднорц 1950

Нобелевская премия по физике 1987 год

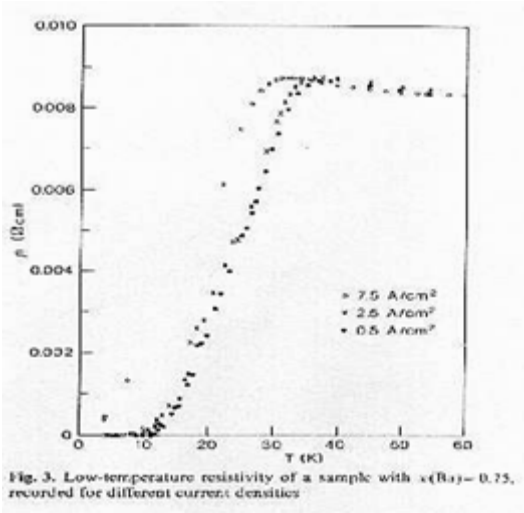
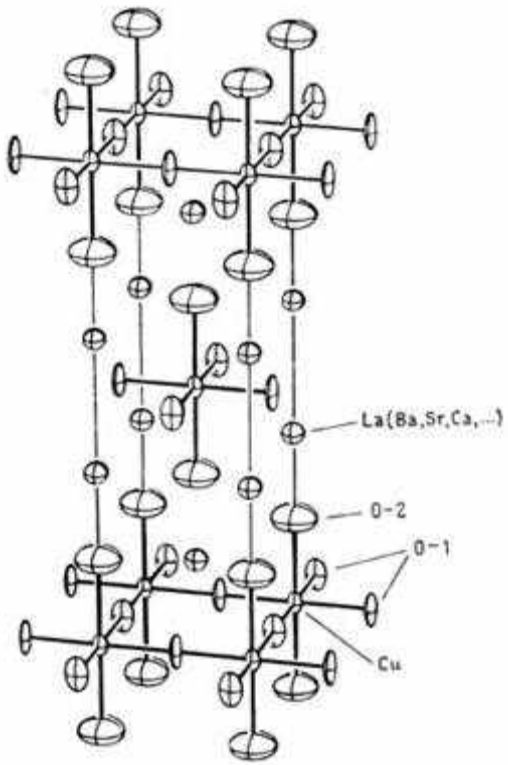


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with x(Ba) = 0.75, recorded for different current densities

J.G. Bednorz, K.A. Muller, Z. Phys. 64, 189 (1986).



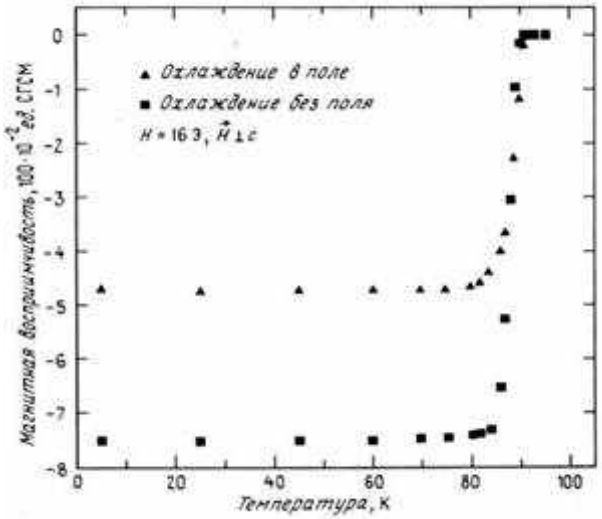
Прежние неудачные попытки с CuCl: Н.Б. Брандт, С.В. Кувшинников, А.П. Русаков, М.В. Семенов, Письма в ЖЭТФ 27, 37 (1978); C. W. Chu, A. P. Rusakov, S. Huang, S. Early, C. Y. Huang, Phys. Rev. B 18, 2116 (1978).

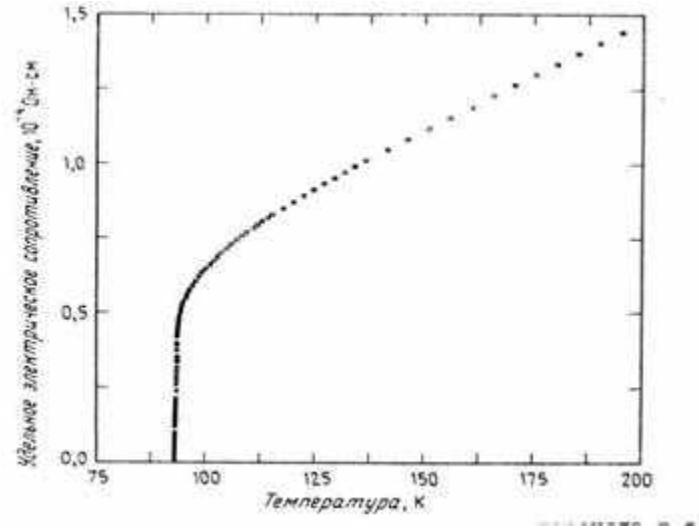
В конце 1986 года результат Беднорца и Мюллера был подтвержден в Токийском университете (Япония) S. Uchida, H. Takagi, K. Kitazawa, and S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys., 26, L1 (1987) и Хьюстонском университете (США) C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang and Y. Q. Wang, Evidence for superconductivity above 40 K in the La-Ba-Cu-O compound system. Phys. Rev. Lett. 58, 405 - 407 (1987). Статья поступила в редакцию в 15 декабря 1986 г. и опубликована 26 января 1987 г.

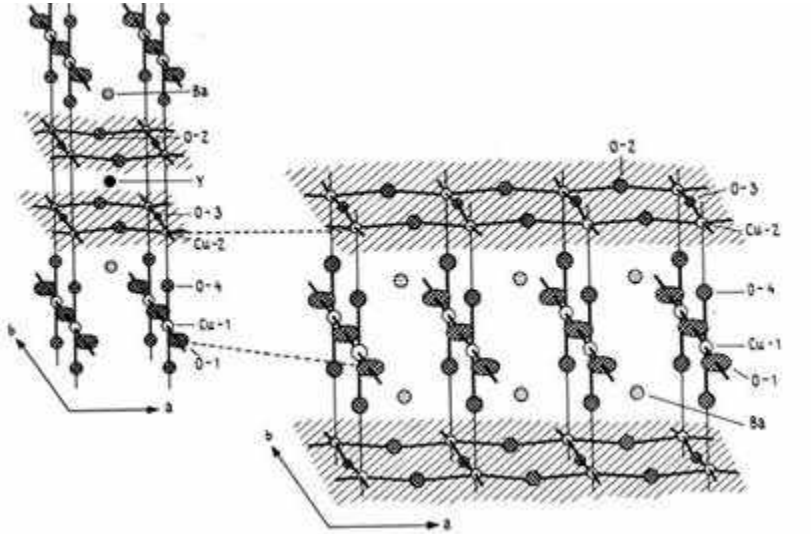
Структура сложного оксида $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ на котором была обнаружена впервые высокотемпературная сверхпроводимость. Лазарев, Кахан и Шаплыгин измеряли зависимость сопротивления этого соединения 1978 году, но только выше 77 К.

В начале 1987 года группа из Университета шт. Алабама и Хьюстонского университета (США) обнаружила, что оксид $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ переходит в сверхпроводящее состояние при температуре выше 90 К. M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Yb-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. Phys. Rev. Lett. 58, 908 (1987). Статья поступила в редакцию в 7 февраля 1987 г. и опубликована 9 марта 1987 г.

Открытие было почти сразу подтверждено группой из Bell Communications Research, J. M. Tarascon, L. H. Greene, W. R. McKinnon, and G. W. Hull, Phys. Rev. B 35, 7115 - 7118 (1987). Статья поступила в редакцию в 27 февраля 1987 г. и опубликована 13 мая 1987 г.



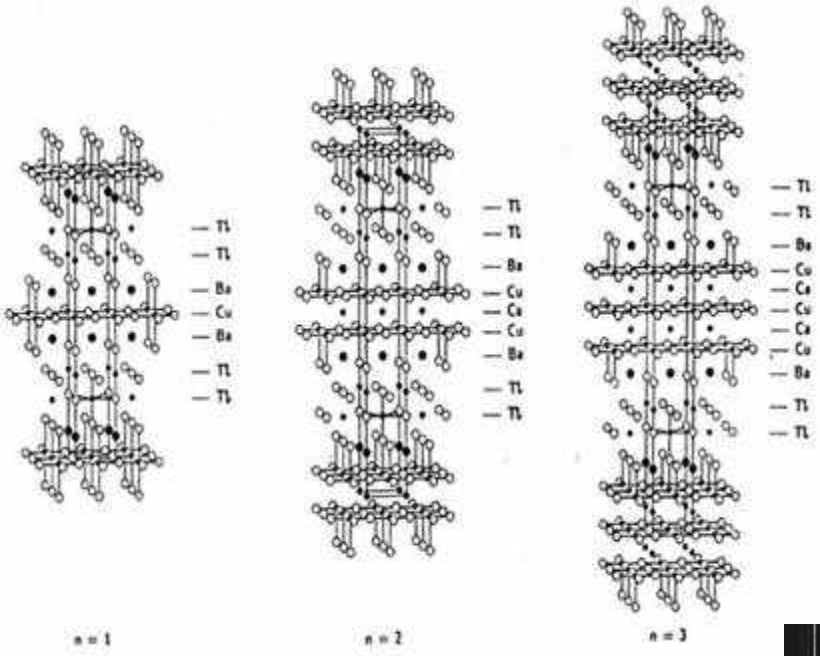




Структура $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Резкое уменьшение магнитной восприимчивости и сопротивления до неизмеримо малых величин свидетельствует о переходе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в сверхпроводящее состояние. Изменение магнитной восприимчивости при охлаждении в небольшом магнитном поле свидетельствует о захвате магнитного потока, что характерно для сверхпроводника второго рода с пиннингом.

В начале 1988 года были открыты слоистые соединения $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ и $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ с еще большей критической температурой. H. Maeda et al., J. Appl. Phys. 27, L209 (1988); Z.Z. Sheng and A.M. Herman, Nature, 332, 55 (1988); S. S. P. Parkin et al., Phys. Rev. Lett. 60, 2539 - 2542 (1988); A. M. Hermann et al., Phys. Rev. B 37, 9742 - 9744 (1988).

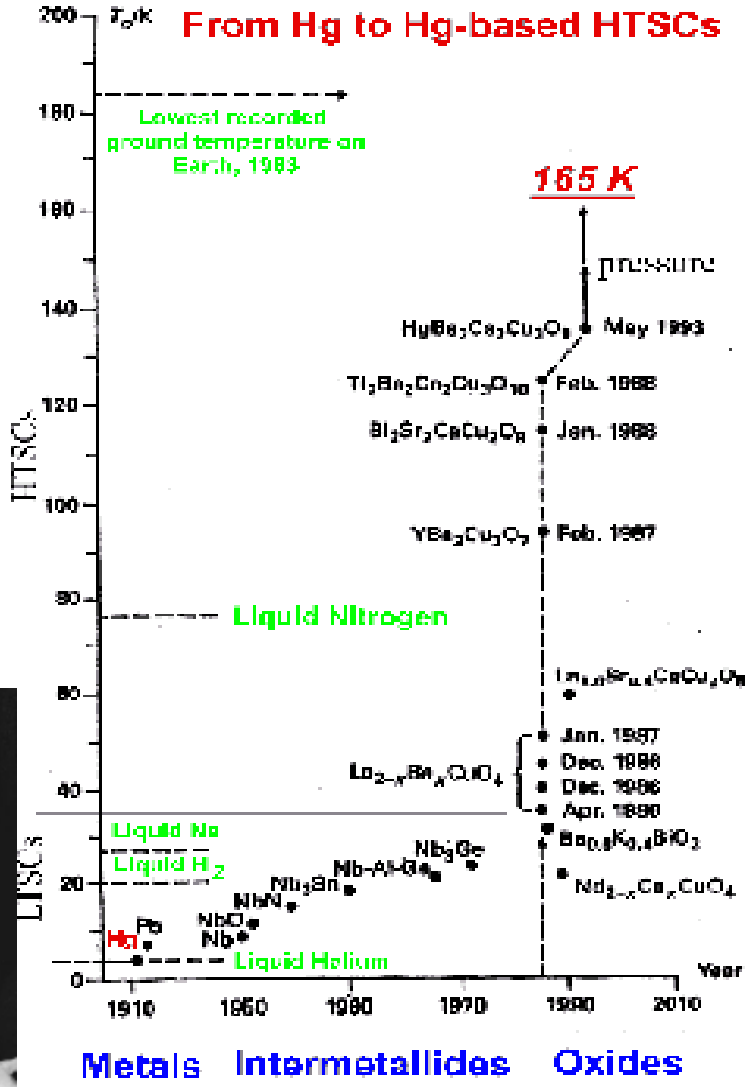


Структура $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$

С.Н.Путилин

К настоящему времени признанным рекордным значением Тс 135 К (под давлением 164 К = -109 ^{0}C) обладает $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$, открытый в МГУ в 1993 году.

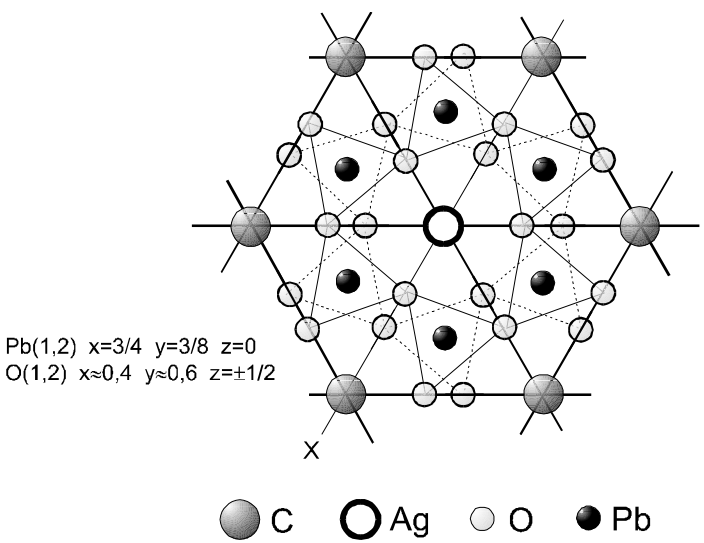
Е.В.Антипов

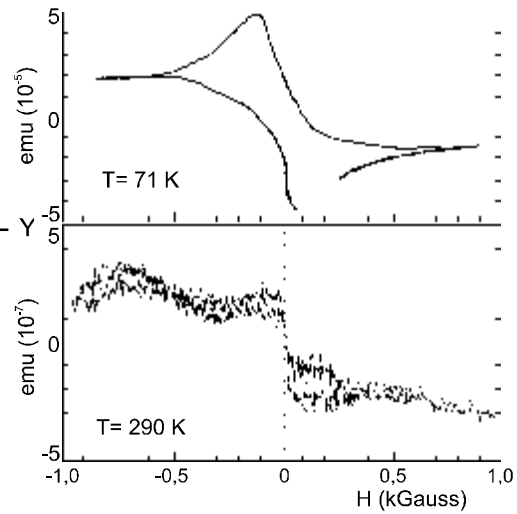


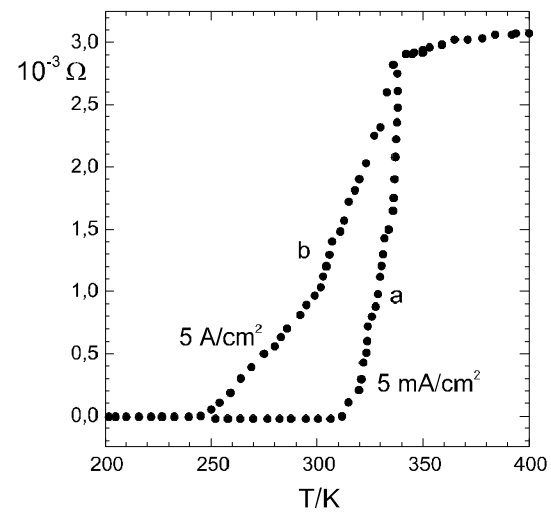
Всего к настоящему времени известно около 50 оригинальных слоистых ВТСП-купратов. Время от времени в печати появляются сенсационные сообщения о создании новых СП с T_c выше комнатной температуры. И хотя безмедные СП известны довольно давно, на них до сих пор не удавалось достичь сколько-нибудь высокой температуры перехода в СП состояние (рекордные значения T_c для безмедных СП достигнуты у $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ и у фазы внедрения на основе фуллерена (Cs_3C_{60}). Отдельно следует упомянуть также направление, связанное с попытками синтеза"экологически безопасных" ВТСП, не содержащих тяжелых металов (Hg, Pb, Ba), например получаемых под высоким давлением оксикупратных фаз кальция.

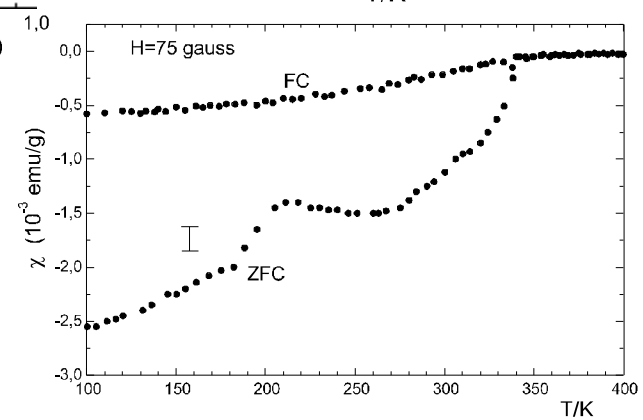
Мечты о сверхпроводимости выше комнатной температуры T_c > 300 K.

D.Djurek, Z. Medunić, A. Tonejc & M. Paljević (Zagreb, Croatia) Onset of superconductivity at 342 K in a novel chain conductor $Ag_{ß}Pb_6CO_9$ (0.7<ß<1). 2001 (unpublished).



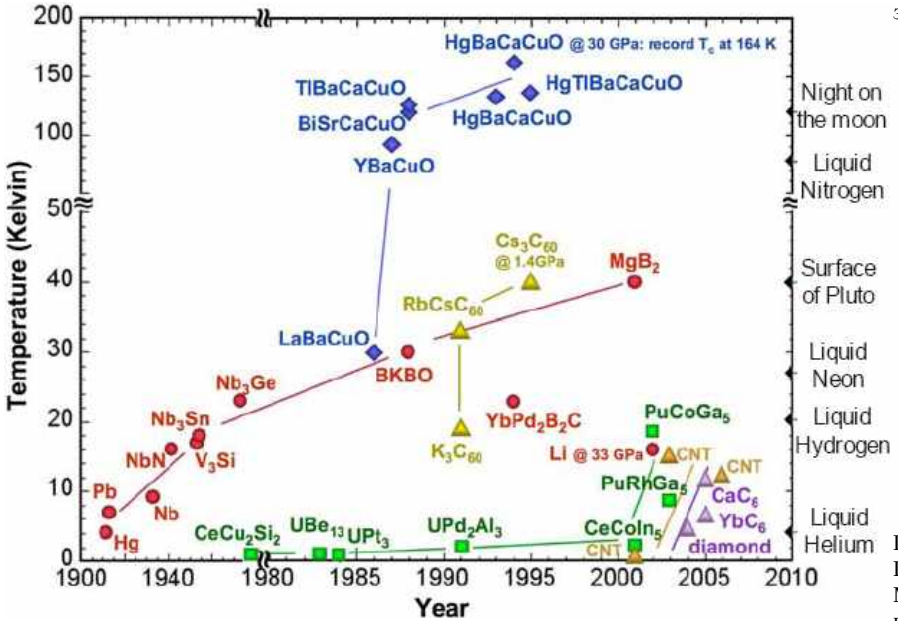






20 лет ВТСП

Ученые мира торжественно отметили 20-летие замечательного события, открывшего новую эру в истории сверхпроводников. В 1986 г. швейцарские ученые K. Alex Muller и J. Georg Bednorz из IBM Zurich Res. Lab. открыли новый класс сверхпроводников, получивших название высокотемпературных – ВТСП [Z.Phys.B, 1986, **64**, 189]. Если в будущем человечество, наряду с национальными праздниками, установит мировые праздники, посвященные научным открытиям, украсившим нашу цивилизацию, то открытие высокотемпературной сверхпроводимости по праву станет рядом с Праздниками электричества, радио, телевидения, компьютеров, Интернета, мобильной связи.



Увеличение темпа открытия новых сверхпроводников после открытия ВТСП

Таблица. Правительственная поддержка ВТСП разработок в области электроэнергетики

Страна	Агентство	Программа	Период	Объем финансирования, млн. долл.	
				Общий	Ежегодный
США	DoE	ВТСП компоненты электросетей, пленочные проводники (2G)	2003-2007	>100	>20
	DoD	ВТСП мотор для ВМС США (Navy)	2005-2007	85	28
Япония	METI	Программа по созданию ВТСП проводников 2-го поколения (2G)	2003-2008	145	29
Ю.Корея	MOST	DAPAS – разработка ряда ВТСП устройств, в частности, накопителя электроэнергии	2001-2010	103	10
Германия	BMBF	ВТСП 2-го поколения, кабель, мотор, токоограничитель	2005-2008	20	5
Китай		Кабели, токоограничители, трансформаторы, накопители	2004-2008	>50	>10

DoE – Department of Energy (Министерство энергетики, США)
DoD - Department of Defense (Министерство обороны, США)
METI – Ministry of Economy, Trade and Industry (Министерство экономики, торговли и промышленности, Япония)
BMBF - Bundesministerium fьr Bildung und Forschung (Федеральное министерство образования и исследований, Германия)
MOST - Ministry of Science and Technology (Министерство науки и технологии, Ю.Корея)

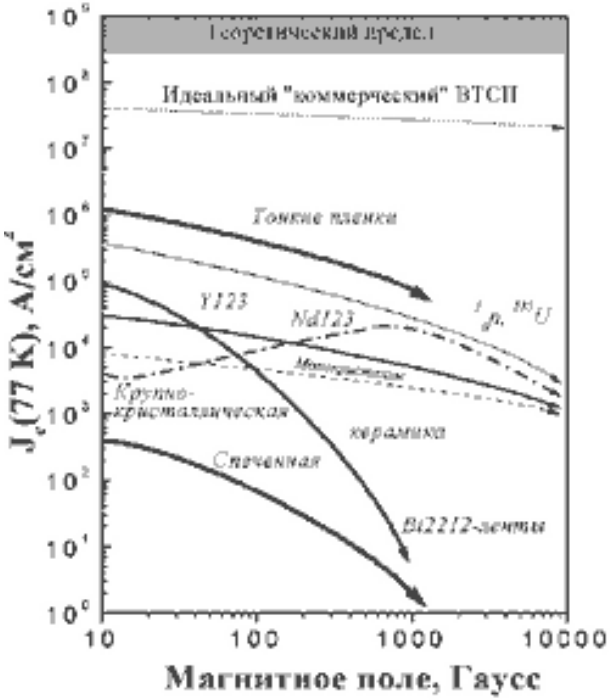
Применения: ограничители тока короткого замыкания, силовые кабели, моторы, генераторы, МГД генераторы, накопители энергии, трансформаторы, сверхпроводящие магниты, ускорители и устройства для термоядерных реакторов, болометры миллиметрового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазона излучений, измерительные устройства, использующие эффект Джозефсона.

Почему использование сверхпроводящих материалов пока не стало массовым?

Главная причина связана с «нетехнологичностью» известных ВТСП с $T_c > 77$ K. Второй причиной является сложность получения ВТСП с большим значением критического тока.

Известные ВТСП имеют достаточно большие значения второго критического поля, но чрезвычайно малые значения корреляционной длины, например : $-dH_{c2\perp}/dT = 2.3$ T/K; $-dH_{c2\|}/dT = 14$ T/K; $\xi_\| = 1.2$ nm; $\xi_\perp = 0.2$ nm. Вследствие малой корреляционной длины термические флуктуации в большей степени чем в обычных сверхпроводниках влияют на резистивные характеристики известных ВТСП.

В последние годы особый интерес технологов привлекает сверхпроводник MgB_2 с $T_c = 39$ K

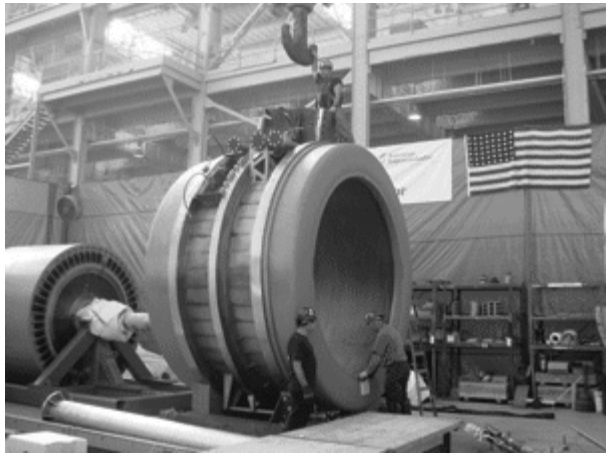


Реализованные применения ВТСП.

Кабель

Albany - самый известный и удачный демонстрационный проект (стоимость 29 млн. долл.) Sumitomo Electric, осуществленный совместно с SuperPower Inc., Niagara Mohawk, BOC group. Финансирование осуществляли Министерство энергетики США и власти штата Нью-Йорк. 350 м, 34,5кВ/800А ВТСП подземный (труба диаметром 150 мм) кабель ("3-in-One") установлен между двумя подстанциями (Riverside и Nenanes) в городе Олбани внутри городской застройки в реально действующей электросети. Sumitomo Electric изготовила и установила ВТСП кабель и осуществила все кабельные соединения. Для кабеля использованы ВТСП ленты DI-BSCCO собственного производства Sumitomo.

Моторы.



Компоненты 36,5 МВт ВТСП мотора на испытательном стенде завода Northrop Grumman.

Соленоиды.

Испытательная катушка для ЯМР томографии японской компании *Hyper Tech*.

Токоограничители

ВТСП УСТРОЙСТВА

Завершенные и продолжающиеся проекты токоограничителей [1]

Головная компания	Страна/ год испытания	Тип	Параметры	Число фаз	ВТСП
ABB	Швейцария/2001	Резистивный	8 кВ, 800 А	1	BSCCO 2212 массив
ACCEL/Nexans SC	**Германия/2004**	**Резистивный**	**6.9 кВ, 600 А**	**3**	**BSCCO 2212 массив**
Nexans	**Германия/2008**	**Резистивно-индуктивный**	**63.5 кВ, 1.8 кА**	**1**	**BSCCO 2212 массив**
KEPRI	**Корея/2007**	**Резистивный**	**13.2 кВ, 630 А**	**3**	**BSCCO 2212 массив**
General Atomics	США/2002	Диодный мост	7.2 кВ, 1.2 кА	1	BSCCO 2223 лента
Yonsei University	Корея/2004	Диодный мост	3.8 кВ, 200 А	3	BSCCO 2223 лента
CAS (Chinese Academy of Sciences)	**Китай/2005**	**Диодный мост**	**6 кВ, 1.5 кА**	**3**	**BSCCO 2223 лента**
Innopower	**Китай/2007**	**Железный сердечник с постоянным смещением**	**20 кВ, 1.6 кА**	**3**	**BSCCO 2223 лента**
KEPRI	Корея/2004	Резистивный	3.8 кВ, 200 А	3	YBCO тонкая пленка
CRIEPI	Япония/2004	Резистивный	1 кВ, 40 А	1	YBCO тонкая пленка
Siemens	Германия/2000	Резистивный	4.2 кВ, 100 А	3	YBCO тонкая пленка
Mitsubishi	Япония/2004	Резистивный	200 В, 1 кА	1	YBCO тонкая пленка
Alcatel	Франция/2001	Резистивный	100 В, 1.4 кА	1	YBCO тонкопленочные проводники
Super Power [3,4]*	**США/2009**	**Резистивный**	**138 кВ, 650 кВ, -кА**	**3**	**YBCO тонкопленочные проводники производства Super Power**
Rolls Royce	**Великобритания—**	**Резистивный**	**6.6 кВ, 400 А**	**—**	**MgB_2**
Siemens/AMSC[4]	**Германия/США 2007**		**13кВ, 800 А**		**YBCO тонкопленочные проводники 344S**
Hyundai ** [2]**	**Корея/2006**		**13,2 кВ, 630 А**		**YBCO тонкопленочные проводники 344S**