

Investigation of the coexistence of
superconductivity and magnetism in
substituted EuFe_2As_2

Lan Maria Tran

27.06.2017, Wrocław

ABSTRACT

The recently discovered iron-based superconductors are one of the most intensely investigated compounds. Although, a number of families of superconductors exhibiting magnetic ordering are known, the iron-based ones are unique, since the superconducting current is carried by the iron-sublattice that simultaneously is responsible for magnetic ordering. Comparing this behaviour to the classical superconductors for which just a 1% of iron doping destroys superconductivity completely, it is obvious that the mechanism responsible for superconductivity in the iron-based materials is unconventional.

Belonging to the so-called 122-family, doped compounds of EuFe_2As_2 were chosen for the investigation in this study. The Eu-based compounds have two “magnetic” sublattices: iron-sublattice exhibiting spin density wave ordering and europium-sublattice which orders antiferromagnetically.

To investigate the magnetic and superconducting properties of this group of compounds, three representatives were chosen:

- $\text{Eu}(\text{Fe}_{0.81}\text{Co}_{0.19})_2\text{As}_2$ — a compound with europium-sublattice and cobalt-doped iron-sublattice;
- $\text{Eu}_{0.73}\text{Ca}_{0.27}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_2\text{As}_2$ — a compound with cobalt doped iron-sublattice, with expected decreased antiferromagnetic interaction due to calcium doping of the europium-sublattice;
- $\text{Ca}(\text{Fe}_{0.96}\text{Co}_{0.04})_2\text{As}_2$ — a calcium-based compound (with no europium ions) used as a reference system, with cobalt-doped iron-sublattice allowing to observe both superconductivity and spin density wave ordering.

The samples were characterised using experimental techniques such as: electrical transport (resistivity, magnetoresistivity, Hall effect), magnetic measurements (AC-susceptibility, magnetisation), Mössbauer spectroscopy and neutron scattering. Multiple (magnetic) phase transitions were observed for investigated systems. Depending on the chemical composition, temperature and applied external magnetic field the physical properties vary. All three compounds are superconducting and exhibit spin density wave ordering of magnetic moments of Fe^{2+} ions. The europium-based materials order antiferromagnetically and in higher external magnetic fields the magnetic moments of Eu^{2+} have a field induced ferromagnetic order.

The most interesting are the europium-based compounds: $\text{Eu}(\text{Fe}_{0.81}\text{Co}_{0.19})_2\text{As}_2$ and $\text{Eu}_{0.73}\text{Ca}_{0.27}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_2\text{As}_2$, for which extraordinary properties such as magnetic field induced superconductivity and

reentrance (reentrance to normal state following transition to superconducting state) were discovered.

From both bulk and microscopic studies it was found that the magnetic structure of the europium-sublattice in the doped EuFe_2As_2 -based systems is a canted antiferromagnetic and the angle at which the magnetic moments of Eu^{2+} ions are declined from the c -axis depends, among others, on the chemical composition. Based on these results, it was suggested that for such a structure, even in zero external magnetic field, an internal magnetic field is present. With application of an external magnetic field, the magnetic moments of Eu^{2+} are reoriented to the direction of the applied field. By varying the total (internal and external) magnetic field perpendicular to the conducting layers (parallel to the c -axis) it is possible to decrease the orbital pair breaking effect and as a result increase the transition temperature to the superconducting state.

We believe that the observed unusual properties of the investigated systems are correlated with the magnetic structure, in which Eu^{2+} magnetic moments order.

STRESZCZENIE

Stosunkowo niedawno odkryte nadprzewodniki na bazie żelaza są obecnie jednymi z szerzej badanych materiałów. Choć istnieje wiele związków wykazujących jednocześnie porządek magnetyczny, to nadprzewodniki na bazie żelaza są wyjątkowe, gdyż obserwuje się w nich przenoszenie prądu nadprzewodzącego w płaszczyznach żelazowych, które jednocześnie wykazują porządek magnetyczny. Gdy porówna się je do klasycznych nadprzewodników, dla których domieszka tylko 1% żelaza niszczy nadprzewodnictwo, od razu można stwierdzić, że mechanizm odpowiedzialny za nadprzewodnictwo w rozważanych związkach żelaza jest niekonwencjonalny.

Do badań wybrano domieszkowane związki EuFe_2As_2 , należące do tzw. rodziny 122. Związki te posiadają dwie podsieci „magnetyczne”: podsieć żelaza wykazującą porządek fali gęstości spinowej i podsieć europu porządkującą się antyferromagnetycznie.

W celu poznania właściwości magnetycznych i nadprzewodzących tych związków wytypowano trzech przedstawicieli:

- $\text{Eu}(\text{Fe}_{0.81}\text{Co}_{0.19})_2\text{As}_2$ — związek z nierozcieńczoną podsiecią europu i z podsiecią żelaza rozcieńczoną kobaltem;
- $\text{Eu}_{0.73}\text{Ca}_{0.27}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_2\text{As}_2$ — związek o spodziewanym obniżeniu oddziaływania antyferromagnetycznego poprzez rozcieńczenie podsieci europu jonami wapnia (nie posiadającymi momentu magnetycznego) i rozcieńczoną podsiecią żelaza jonami kobaltu;
- $\text{Ca}(\text{Fe}_{0.96}\text{Co}_{0.04})_2\text{As}_2$ — związek referencyjny na bazie wapnia (bez jonów europu), domieszkowany kobaltem w stężeniu umożliwiającym obserwację nadprzewodnictwa i porządku fali gęstości spinowej.

Aby scharakteryzować wybrane związki wykonano pomiary: transportu elektrycznego (oporu, magnetooporu i efektu Halla), magnetyczne (podatność zmiennopolowa, namagnesowanie), spektroskopii Mössbauera oraz spektroskopii neutronów. W badanych materiałach zaobserwowano wielokrotne (magnetyczne) przejścia fazowe. W zależności od składu chemicznego, temperatury, a także zewnętrznego pola magnetycznego właściwości fizyczne próbek zmieniają się. Wszystkie trzy badane związki wykazują nadprzewodnictwo. Jednocześnie, obserwowane jest porządkowanie momentów magnetycznych jonów Fe^{2+} w postaci fali gęstości spinowej. Próbki zawierające europ, manifestują porządek antyferromagnetyczny momentów magnetycznych jonów Eu^{2+} , a w dostatecznie wysokich zewnętrznych polach magnetycznych wymuszony porządek ferromagnetyczny.

Na szczególną uwagę zasługują domieszkowane związki europu: $\text{Eu}(\text{Fe}_{0.81}\text{Co}_{0.19})_2\text{As}_2$ oraz $\text{Eu}_{0.73}\text{Ca}_{0.27}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_2\text{As}_2$, dla których zaobserwowano niezwykle właściwości, takie jak nadprzewodnictwo indukowane polem magnetycznym, czy też zachowanie typu *reentrant* (tzn. powrót do stanu normalnego poprzedzony przejściem do stanu nadprzewodzącego).

Zarówno z pomiarów objętościowych, jak i mikroskopowych wynika, że struktura magnetyczna podsieci europu domieszkowanych związków EuFe_2As_2 jest antyferromagnetyczna typu *canted* (deklinacyjna), w której kąt pod jakim momenty magnetyczne jonów Eu^{2+} są uporządkowane względem osi *c*, zależy m.in. od składu chemicznego. Ze względu na taką strukturę, nawet w zerowym polu magnetycznym sugeruje się istnienie wewnętrznego pola magnetycznego. Pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego momenty magnetyczne jonów Eu^{2+} przeorientowują się na kierunek pola magnetycznego. Zmniejszając sumaryczne pole magnetyczne działające prostopadle do płaszczyzn nadprzewodzących (pole równoległe do kierunku *c*) możliwe jest zmniejszenie efektu orbitalnego rozrywania par, a co za tym idzie podwyższenie temperatury przejścia do stanu nadprzewodzącego.

W oparciu o uzyskane wyniki uważamy, że obserwowane nietypowe właściwości są pośrednio związane ze strukturą magnetyczną, w jakiej porządkują się momenty magnetyczne jonów Eu^{2+} .