



LV 138.039 EINFÜHRUNG IN DIE FORSCHUNGSGEBIETE DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK

- **4 Online-Termine:**
- E138 Festkörperphysik: Freitag, 19. März 2021, 12:00 Uhr <u>https://tuwien.zoom.us/j/96761099490?pwd=L0lQeUtqcTl0c1lzeUozd0NLdzdqZz09</u> Christoph Eisenmenger-Sittner
- E141 Atominstitut:

stitut: Freitag, 26. März 2021, 12:00 Uhr https://tuwien.zoom.us/j/93708058787?pwd=bys2dEl2akZjaWZBZFkvMUw1cm9nQT09 Erwin Jericha/Peter Rabl

- E134 Angewandte Physik: Freitag, 23. April 2021, 12:00 Uhr <u>https://tuwien.zoom.us/j/99602174652?pwd=VDZNZkgwOXBrV3RUSFIzWIRQcFBYZz09</u> Ille Gebeshuber
- E136 Theoretische Physik: Freitag, 7. Mai 2021, 12:00 Uhr <u>https://tuwien.zoom.us/j/93323291202?pwd=Z3cxNFVIRG9JRGwvUk8yczNvSEtGQT09</u> Gerhard Kahl





DAS IFP IM FREIHAUS

		IFP	
		IFP/USTEM	
		IFP	IFP
		IFP	IFP
			IFP/IAP
			Praktikum
Strassen-			
niveau	Tieftemperaturanlagen		
	S	chwingungsarme Räum	ne





ORGANIGRAMM

Computational Materials Science



Computational Materials Science (Held)

Correlations: Theory

and Experiments

Novel Electronic Materials and Concepts (Barišić)



Quantum Many-Body Physics (Toschi)



Theory of Electronic Correlations and Collective Phenomena (Kuneš)





Electron Microscopy and Materials (Fidler)



Functional Materials (Eisenmenger-Sittner)



Magnetism and Superconductivity (Bauer)



Tuning Charge and Spin of Correlated Electrons (Pustogow)



Quantum Materials

Quantum Materials (Bühler-Paschen)



Vienna Microkelvin Laboratory (Bühler-Paschen)

Solid State Spectroscopy



Solid State Spectroscopy (Pimenov)





PRÄSENTATIONEN

Time	Topic/Research Unit	Presenter
12:00	Introduction	Eisenmenger-Sittner
12:10	Quantum Materials	Bühler-Paschen
12:30	Computational Materials Science	Held
12:50	Functional and Magnetic Materials	Pustogow
13:10	Solid State Spectroscopy	Constable
13:30	Correlations: Theory and Experiments	Toschi





NEUE MATERIALIEN UND DEREN EIGENSCHAFTEN BEI EXTREMEN SKALEN (Temperatur, Druck, Magnetfeld) im Makro-, Mikro- und Nanobereich





einer Kupferrinne



Feynman diagram

NEUE MATERIALIEN UND DEREN EIGENSCHAFTEN BEI EXTREMEN SKALEN (Temperatur, Druck, Magnetfeld) im Makro-, Mikro- und Nanobereich

SYNTHESE PRÄPARATION	STRUKTUR ANALYTIK	EIGENSCHAFTEN	THEORIE MODELLIERUNG
	<image/>	<image/> <image/> <image/> <image/>	→ correlations
Spiegelofen			Solid state Hamiltonian

Rasterelektronenmikroskop

Kernentmagnetisierungskryostat





... FÜR HIGH-TECH-ANWENDUNGEN VON HEUTE UND MORGEN

















ERASMUS AUSTAUSCHPROGRAMM

Dipl - Chem. Anna Pimenov Erasmus - Koordinatorin

anna.pimenov@tuwien.ac.at



Koordination/ Beratung

Hauptanmeldung 1.2. – 15.3.

Anmeldung zur Sprechstunde:

nicolas.weilguny@tuwien.ac.at sekretariat+e138@tuwien.ac.at

- mit Erasmus+ können Studierende einen Teil ihres Studiums an Hochschulen in Programmländern absolvieren.
- die monatliche Fördersumme beträgt zwischen 350 und 400 Euro.





VIEL SPASS BEI DEN FÜHRUNGEN DURCH UNSER INSTITUT!









Clemens Watzenböck







Matthias Pickem



Dr. Friedrich

Krien



Dr. Liang Si





Dr. Markus Wallerberger



Josef Kaufmann



Patrick Kappl



Dr. Sebastian Huber





Dr. Anna Kauch



Paul Worm

AG Held: Research topics

computational materials science: DFT+DMFT

quantum field theory: DLA

• machine learning

Physics of strongly correlated electron systems: thermoelectrics, solar cells, kinks, QCP, heterostructures, quantum dots, π-tons ...

AG Held: Research topics

→ VU computational materials science: DFT+DMFT

quantum field theory: DTA

→ VO Quantum field theory for many body systems SS 21

• machine learning

 \rightarrow VU machine learning in physics SS 22

 physics of strongly correlated electron systems: thermoelectrics, solar cells, kinks, QCP, heterostructures, quantum dots, π-tons ...

	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian

	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian



	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian



	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian



	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian





	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian



	LDA bandstructure	many body theory
+	 material-specific, "ab initio" 	 electronic correlations
	 often successful, quantitative 	 qualitative understanding
_	 effective one-particle approach 	 model Hamiltonian



Ab-initio Hamiltonian

(non-relativistic/Born-Oppenheimer approximation)



Ab-initio Hamiltonian

kinetic energy lattice potential Coulomb interaction $H = \sum_{i} \left[-\frac{\hbar^{2} \Delta_{i}}{2m_{e}} + \sum_{l} \frac{-e^{2}}{4\pi\epsilon_{0}} \frac{Z_{l}}{|\mathbf{r}_{i} - \mathbf{R}_{l}|} \right] + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^{2}}{4\pi\epsilon_{0}} \frac{1}{|\mathbf{r}_{i} - \mathbf{r}_{j}|}$

(non-relativistic/Born-Oppenheimer approximation)

Ab-initio Hamiltonian

(non-relativistic/Born-Oppenheimer approximation)



LDA bandstructure corresponds to

$$H_{\text{LDA}} = \sum_{i} \left[-\frac{\hbar^2 \Delta_i}{2m_e} + \sum_{l} \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_l|} + \int \mathrm{d}^3 r \, \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|} \rho(\mathbf{r}) + V_{xc}^{\text{LDA}}(\rho(\mathbf{r}_i)) \right]$$



Quantum Field Theory for Solids

Development of new methods

e.g. dynamical vertex approximation (D Γ A), 1PI functional



- Magnons
- Quantum criticality
- High temperature superconductivity

ERC grant Abinitio $\mathsf{D}\Gamma\mathsf{A}$

Zero bias anomaly quantum dot

Nano Lett. 2020, 5201 (2020)



Impact ionization in solar cells Phys. Rev. B 102, 245125 (2020)

Nickelate superconductors

npj Quantum Materials 5, 59 (2020)





Zero bias anomaly quantum dot

Nano Lett. 2020, 5201 (2020)





Impact ionization in solar cells Phys. Rev. B 102, 245125 (2020)

Nickelate superconductors

npj Quantum Materials 5, 59 (2020)



 π -tons

Zero bias anomaly quantum dot

Nano Lett. 2020, 5201 (2020)



Impact ionization in solar cells Phys. Rev. B 102, 245125 (2020)

Nickelate superconductors

npj Quantum Materials 5, 59 (2020)





A physics example: π -tons



π -ton polaritons: quasiparticles that couple light and solid



https://www.derstandard.at/story/2000114147291/wienerforscher-entdecken-bisher-unbekanntes-komplexes-quasiteilchen

A physics example: π -tons









excitons: 1 particle 1 hole coupled by Coulomb interaction



k-k′≈π

π-tons: *2 particle-hole pairs* coupled by AFM/CDW fluct.

A physics example: π -tons









excitons: 1 particle 1 hole coupled by Coulomb interaction



k-k′≈π

π-tons: *2 particle-hole pairs* coupled by AFM/CDW fluct.



"Einführung in Forschungsgebiete der Fakultät für Physik" (LVA 138.039)

E-138 Institute of Solid State Physics



Forschungsbereich:

Correlations: Theory & Experiments

Alessandro Toschi

Forschungsbereich: Correlations: Theory & Experiments FBL AG Toschi Quantum many-body physics AG Barisic

Novel electronic materials & concepts

AG **Kunes** Theory of electronic correlations & collective phenomena

What is electronic correlations?

A general definition:

$\langle A B \rangle = \langle A \rangle \langle B \rangle$

UNcorrelated electrons:

A:

B:

time





The challenge of correlations:

The "Mikado" example:



Playing with correlations!

41 mikados





condensed matter

toy model








Fascinating physics:

1) HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY



2) MOTT TRANSITION



Mc Whan et al., PRB (1973)

3) QUANTUM CRITICALITY



J. Custers et al., Nature (2003)

4) OPTICAL LATTICES



M. Greiner et al., Nature (2008)

AG Toschi

[Email: toschi@ifp.tuwien.ac.at - Website: https://www.ifp.tuwien.ac.at/qmb/.]



P. Chalupa



A. Toschi

UniWü & TU Wien



S. Adler

Collaborations:

@ ESI



L. Del Re

@ IARAI



D. Springer



M. Reitner

Further close collaborations: P. Oberleitner (PA), M. Pelz (MA) & A. Vock (former MA) // C. Watzenböck (MA, now PhD) & J. Tomczak (AG Held)

AG Toschi



Temporal Correlations : Magnetism

underdamped overdamped



Temporal Correlations : Magnetism



Temporal Correlations: Quantum criticality



Suprises of strong correlations

[https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/presseaussendungen/news/klebrige-elektronen-aus-abstossung-wird-anziehung]



AG Kunes

[Email: <u>kunes@ifp.tuwien.ac.at</u> - Website: https://www.ifp.tuwien.ac.at/kunes/]



Atsushi Hariki



Jan Kuneš



Dominique Geffroy



Abuduanini Niyazi







TECCP

Materials

3d oxides (MnO, NiO, LaCoO₃, SrVO₃, ... 4d and 5d oxides (Sr₂IrO₄, Na₂IrO₃, SrRu₂O₆, ... 4f materials (Pr, Nd, Eu, Gd, Yb, ...)

Properties: Spectroscopies (photoemission, optics, x-ray, ...) Magnetic (ordered states, susceptibility, g-factors) Exotic ordering - exciton condensation



TECCP

ModelsHubbard model + generalizations
spin models
multi-component hard-core bosons

Properties: Phase diagrams Static and dynamical response functions



TECCP

Methods

density functional theory (Wien2k) construction of models (wien2wannier) dynamical mean-field theory (DMFT) impurity solvers (many-body) Quantum Monte-Carlo Exact diagonalization





AG Barisic

[Email: barisic@ifp.tuwien.ac.at]



B. Klebel-Knobloch



N. Barisic



T. Wojciech



N.K. Chogondahalli Muniraju



Three key elements of the conducted research!

1.) synthesis & characterization

2.) application of various experimental methods

3.) conceptual understanding

1.) synthesis & characterization

• The "holy Grail": high-Tc superconducting cuprates



$(La, Ba)_2 CuO_4 \qquad HgBa_2 CuO_{4+\delta} \quad YBa_2 Cu_3 O_{7-\delta} \quad Bi_2 Sr_2 CaCu_2 O_8 Tl_2 Ba_2 Ca_2 Cu_3 O_{10}$

Synthesis X. Zhao *et al., Adv. Mater.* **18**, 3243 (2006) Vigilant characterization N. Barišić *et al., Nat. Phys.* **9**, 761 (2013)

- New lab for the syntesis of single crystals
- -) Topological insulators: BiSbTe₂S, BiSbTeSe₂, Pb_{1-x}Sn_xSe
- -) Dirac semimetals: PbSnSe, ZrSiS, ZrSiSe, ZrSiTe, HfSiS, Cd₃As₂
- -) Weyl semimetals: TaAs, TaP, NbAs, NbP
- -) Magnetically ordered systems



2.) application of various experimental methods

"In-house" experimental work:

Magnetic susceptibility

➤Transport

(temperature range: 1.5-1200K, high pressure: up to 3Gpa, and magnetic field) ➤ Microwaves (contactless) ➤ Nonlinear conductivity ➤ XPS

 Optical conductivity meas.
(large temperature (5 – 300 K) and frequency range (15 - 25 000 cm⁻¹), pressures up to 2.7GPa
X-ray (Laue, XRD) Novel Experimental tools



• Presence at large user facilities





3.) conceptual understanding

 application of existing concepts and theories (Fermi-liquid, percolations, effective medium approximation...)

adapting them to novel problems (arcs, gradual localization ...)







Understanding of observed behaviors Reaching the overall picture

Forschungsbereich: Correlations: Theory & Experiments FBL AG Toschi Quantum many-body physics AG Barisic

Novel electronic materials & concepts

AG **Kunes** Theory of electronic correlations & collective phenomena

Einführung in die Forschungsgebiete der Fakultät für Physik



Assistant Prof. Andrej Pustogow

Pustogow Spectroscopy Lab



https://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/pustogow-research



Andrej Pustogow

• E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien

- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - *Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten*
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Andrej Pustogow

Institut für Festkörperphysik



3

Institut für Festkörperphysik



Institut für Festkörperphysik



2020: Rückkehr nach Wien



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - *Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten*
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden

 \geq

> Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Andrej Pustogow



4 August 1972, Volume 177, Number 4047

More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

Emergenz Das System ist mehr als die Summe seiner Einzelteile

Hochenergie-Physik

Elementarteilchen mit Eigenschaften laut Standardmodell (Ladung, Spin, Masse, ...)



Festkörperphysik

- kollektive Effekte/Ordnung
- niedrig-energetische Anregungen
 - durch Quasiteilchen beschrieben



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Elektronen in Festkörpern

Energie und Impuls elektronischer Zustände im periodischen Kristallgitter

- Kristallimpuls $p = \hbar k$
- Effektive Masse $m^* \neq m_e$





Philip W. Anderson (1923-2020)

Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Andrej Pustogow





- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - > Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - *Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten*
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Andrej Pustogow

Elektronische Korrelationen



stark korrelierte Elektronensysteme typisches Metall (Ag, Au, Al, ...) freies Elektron (in Vakuum)

 $E = p^2 / 2m_e$

$$E = (\hbar k)^2 / 2m^*$$

 $m^* \approx m_{e}$

 $m^* \gg m_{\rm e}$





2021



2021-03-19

Andrej Pustogow

Elektronische Korrelationen



2021-03-19

Elektronische Korrelationen



stark korrelierte Elektronensysteme typisches Metall (Ag, Au, Al, ...)



<u>,gute' Metalle</u>

- wenig Streuung
- niedriger elektrischer Widerstand
- guter elektrischer Leiter (z.B. Cu)



Wie oft werden die Elektronen gestreut?

selten

<u>,schlechte' Metalle</u>

- viel Streuung
- hoher Widerstand
- Elektronen streuen an anderen Elektronen

Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19




Forschungshighlight



Hubbard Modell $H = -t \sum_{\langle ij \rangle, \sigma} (c_{i\sigma}^{\dagger} c_{j\sigma} + H.c.) + U \sum_{ij \rangle, \sigma} n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$

abstoßende Wechselwirkung zwischen Menschen

- Regelmäßige Anordnung
- 1 Person pro Platz



potenzielle Energie

Coulomb Abstoßung, falls sich 2 Elektronen auf demselben Gitterplatz befinden



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19







Highlight: Theorie und Experiment quantitativ vereint!

Pustogow *et al., Nat. Mater.* **17**, 773-777 (2018) https://doi.org/10.1038/s41563-018-0140-3



Electronic Correlations U/W

Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Coulomb-Abstoßung U und elektronische Bandbreite $W \propto t$ wurden mittels optischen Messungen direkt aus dem Spektrum bestimmt



SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

CONDENSED MATTER PHYSICS

Internal strain tunes electronic correlations on the nanoscale

A. Pustogow¹*[†], A. S. McLeod^{2,3}*[†], Y. Saito^{1,4}, D. N. Basov^{2,3}, M. Dressel¹*

Pustogow *et al., Sci. Adv.* **4**, eaau9123 (2018) https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9123

Highlight: Mikroskopisch aufgelöste Messungen eines Metall-Isolator Übergangs!

> scanning near-field optical microscopy (SNOM)



- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - > Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Geometrische Frustration



wegen Pauli-Prinzip:

Mott Isolatoren haben Tendenz zu Antiferromagnetismus

Austausch-Wechselwirkung $J \propto \frac{t^2}{v}$ (*'itinerant exchange mechanism'*)



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Geometrische Frustration



wegen Pauli-Prinzip:

Mott Isolatoren haben Tendenz zu Antiferromagnetismus

> hexagonale Bienenwaben (engl. 'honeycomb')

Geometrische Frustration

antiferromagnetische Ordnung der Spins kann sich auf Gittern mit Dreiecksmotiv nicht ausbilden, bzw. wird unterdrückt

Dreiecksgitter

Kagome-Gitter



2021-03-19

Quanten-Spin-Flüssigkeit

Valence Bond Solid

(e.g. Spin-Peierls in 1D)

Resonating Valence Bond (RVB) State



Balents, Nature 464, 199–208 (2010)





Quanten-Spin-Flüssigkeit

Spinon: neutrale $S = \frac{1}{2}$ Anregung



Frei bewegliche Spinon Quasi-Teilchen? (wie Elektronen in Metallen, aber ohne Ladung!)



Balents, Nature 464, 199-208 (2010)

interessant für: Quantencomputer



Pustogow Spectroscopy Lab





Nein, keine frei beweglichen Spinon-Quasiteilchen! Miksch, Pustogow, *et al.* (2021) https://arxiv.org/abs/2010.16155 (erscheint demnächst in *Science*)

Elektronen in Metallen

- Ladung e
- Spin $S = \frac{1}{2}$
- $m^* \neq m_e$

- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - *Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten*
 - > Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



> Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Supraleitung

normales Metall

- elektrischer Widerstand
- einzelne Elektronen





Pustogow Spectroscopy Lab



```
2021-03-19
```

Supraleiter

- kein elektrischer Widerstand
- Elektronen in Cooper-Paaren





Supraleitung

Supraleiter

- kein elektrischer Widerstand
- Elektronen in Cooper-Paaren •



attraktive Wechselwirkung



abstoßende Wechselwirkung zwischen Menschen

- Regelmäßige Anordnung •
- 1 Person pro Platz •



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19



Supraleitung

Sind die Spins innerhalb eines Cooper-Paars zueinander antiparallel (Singulett) oder parallel (Triplett) ausgerichtet?





Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Supraleiter

- kein elektrischer Widerstand
- Elektronen in Cooper-Paaren



attraktive Wechselwirkung



Spin-Triplett Supraleitung

1998



Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Spin-Triplett Supraleitung

nature

Letter Published: 23 September 2019

Constraints on the superconducting order parameter in Sr₂RuO₄ from oxygen-17 nuclear magnetic resonance

A. Pustogow ⊠, Yongkang Luo ⊠, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer & S. E. Brown ⊠

Nature 574, 72–75(2019) Cite this article

https://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/pustogow-research/interest-1 https://doi.org/10.1038/s41586-019-1596-2

Sr₂RuO₄

- lange Zeit der heißeste Kandidat für triplett Supraleitung
- früheres Ergebnis widerlegt: sehr wohl eine Reduktion von *K*!







Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Andrej Pustogow

2019

Breite Resonanz in der Community

nature

Letter Published: 23 September 2019

Constraints on the superconducting order parameter in Sr₂RuO₄ from oxygen-17 nuclear magnetic resonance

A. Pustogow ⊠, Yongkang Luo ⊠, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer & S. E. Brown ⊠

Nature 574, 72–75(2019) Cite this article

https://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/pustogow-research/interest-1 https://doi.org/10.1038/s41586-019-1596-2





Andrej Pustogow

https://www.cpfs.mpg.de/3114492/20190924?c=2123253



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMISCHE PHYSIK FESTER STOFFE

HOME | INSTITUT | FORSCHUNG | PUBLIKATIONEN | IMPRS | KARRIERE | NEWSROOM

- Startseite > Newsroom > Pressemeldungen > Rewriting the story of unconventional superconductivity of Sr2RuO4; twenty year old
 Rewriting the story of unconventional
 - superconductivity of Sr₂RuO₄: twenty year old
- 🔓 result overturned

23. SEPTEMBER 2019

Image: Image

LA Home College
UCLA Physical Sciences
HOME ABOUT DEPARTMENTS NEWS WHO WE ARE RESOURCES & OUTREACH ALUMNI GIVING

Solving a puzzle of unconventional superconductivity

The phenomenon of superconductivity is one of the most fascinating properties of electrons in solids. Among known superconductors, the material Sr_2RuO_4 is one of the most important, it is the cleanest superconductor y discovered.

New research published in the journal, Nature, has solved one of the puzzles around this material. The research is a collaboration among Stuart Brown's research group; Eric Bauer, a staff scientist at Los Alamos National Inzie, director of physics of quantum materials at the Max Planck Institute for the Chemical Physics of Solids in



- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - *Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten*
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden: Licht-Materie Wechselwirkung
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)

Light

photon = oscillating electromagnetic field



Matter

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19

- protons
- neutrons
- electrons

Crystal

- lattice sites (nuclei + core electrons, molecules)
- valence electrons









Optisches Spektrum



2021-03-19



Optische Spektroskopie



- E138-03 Funktionelle und Magnetische Materialien
- Elektronische Korrelationen
- Forschungsthemen
 - Mott Isolatoren und ,schlechte Metalle'
 - > Geometrische Frustration und Quanten-Spin-Flüssigkeiten
 - Unkonventionelle Supraleitung
- Experimentelle Messmethoden: Licht-Materie Wechselwirkung
 - > Optische Spektroskopie

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19



> Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonance – NMR)



Magnetische Resonanz



- Zeeman Aufspaltung in externem Magnetfeld B₀
- $\Delta E_Z = \hbar \gamma B = \hbar \omega_L$

Pustogow Spectroscopy Lab

2021-03-19





Magnetische Resonanz



Proton

 $\gamma_p = 42.6 \text{ MHz/T}$

Atomkern

 $\gamma_n = 1 - 40 \text{ MHz/T}$

 $\gamma_p = \frac{e}{2m_p} g_p \ll \gamma_e$

 $\gamma_n \leq \gamma_p \ll \gamma_e$

Magnetische Resonanz



2020-11-25

NMR – Nuclear Magnetic Resonance



2021-03-19

NMR – Nuclear Magnetic Resonance



Paramagnetische Metalle

Spin der Leitungselektronen ٠ erzeugt lokales Magnetfeld am Ort des Atomkerns

•
$$\Delta f = K f_0$$
 $K \propto 10^{-2}$

Atomkern 'fühlt' lokales Magnetfeld der Elektronen!

Pustogow Spectroscopy Lab



2021-03-19

Magnetische Materialien

- lokales Magnetfeld sehr groß •
- Antiferromagnetismus: • Aufspaltung der Resonanz-Linien







2021-03-19

https://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/pustogow-research





E138-04: Quantum Materials Gruppe Bühler-Paschen

https://www.ifp.tuwien.ac.at/paschen/





Quantenmaterialien

Materialien, deren makroskopische Eigenschaften durch die quantenphysikalische Wellenfunktion von Elektronen geprägt werden, und zwar wegen

- der Wechselwirkung zwischen Elektronen
- ihrem topologischen Charakter
- Beispiele:
- Quantenkritische Materialien
- Topologische Materialien





Quantenmaterialien

Materialien, deren makroskopische Eigenschaften durch die quantenphysikalische Wellenfunktion von Elektronen geprägt werden, und zwar wegen

- der Wechselwirkung zwischen Elektronen
- ihrem topologischen Charakter Beispiele:
- Quantenkritische Materialien
- Topologische Materialien







Quantenmaterialien

Materialien, deren makroskopische Eigenschaften durch die quantenphysikalische Wellenfunktion von Elektronen geprägt werden, und zwar wegen

- der Wechselwirkung zwischen Elektronen
- ihrem topologischen Charakter Beispiele:
- Quantenkritische Materialien
- Topologische Materialien








Quantenmaterialien

Materialien, deren makroskopische Eigenschaften durch die quantenphysikalische Wellenfunktion von Elektronen geprägt werden, und zwar wegen

- der Wechselwirkung zwischen Elektronen
- ihrem topologischen Charakter Beispiele:
- Quantenkritische Materialien
- Topologische Materialien







Quantenmaterialien

Materialien, deren makroskopische Eigenschaften durch die quantenphysikalische Wellenfunktion von Elektronen geprägt werden, und zwar wegen

- der Wechselwirkung zwischen Elektronen
- ihrem topologischen Charakter

Beispiele:

- Quantenkritische Materialien
- Topologische Materialien





Quantenkritische Materialien



Prochaska et al., Science 367, 285 (2020)





Topologische Materialien



Dzsaber et al., PNAS 118, e2013386118 (2021)





Experimentelle Methoden

- Synthese <u>Einkristallzucht, Molekularstrahl-Epitaxie (mit ZMNS)</u>
- Strukturelle und analytische Charakterisierung Röntgendiffraktion, Elektronenmikroskopie; TU Zentren
- Physikalische Eigenschaften in großen *T*, *B*, *p*-Bereichen Elektrischer und thermischer Transport, magnetische und thermische Eigenschaften
- Experimente and Großforschungsanlagen: n, μ , ph





Experimentelle Methoden Synthese Einkristallzucht, Molekularstrahl-Epitaxie (mit ZMNS) Strukturelle und analytische Charakterisierung Röntgendiffraktion, Elektronenmikroskopie; TU Zentren • Physikalische Eigenschaften in großen T, B, p-Bereichen Elektrischer und thermischer Transport, magnetische und thermische Eigenschaften • Experimente and Großforschungsanlagen: n, μ , ph





Synthese



Spiegelofen für Einkristallzucht

Molekularstrahlepitaxie-Anlage (ZMNS)







Physikalische Eigenschaften



Kernentmagnetisierungskryostat: Der kälteste Ort Österreichs – Proben auf <100 μ K











Das Team

- "Teachers" (Assoc. Prof., Univ. Ass., PostDocs): Gaku EGUCHI, Günther LIENTSCHNIG, Duy Ha NGUYEN, Andrey PROKOFIEV, Mathieu TAUPIN, Xinlin YAN, Diego ZOCCO
- "Students" (PhD students, Mater students): Emine BAKALI, Emine BAKALI, Federico MAZZA, Lukas PROCHASKA, Diana KIRSCHBAUM







Abschlussarbeiten im letzten Jahr Doktorarbeit: Sami Dzsaber Diplomarbeiten: Judith Benkö, Christoph Wilhelmer Bachelorarbeiten: Tobias Peherstorfer, Rebecca Chizzola, Prem Wolfrum Projektarbeiten • Einkristallherstellung und Probenpräparation (131.024)

- Quantenphänomene in Festkörpern (131.060)
- Thermoelektrika (131.062)





Quantum Materials Gruppe Bühler-Paschen

https://www.ifp.tuwien.ac.at/paschen/

paschen@ifp.tuwien.ac.at

Evan CONSTABLE





Insititut für Festkörperphysik – TU Wien

group leader: Prof. Andrei Pimenov

Solid-state Spectroscopy





Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.







Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared).





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared).





Invisible heat rays!



Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared). **Invisible heat rays!**





EFĠH

A B

C

D



Ritter — in 1801 discovered chemical energy in the portion above the violet (UV).



Red

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





КĻМ



Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared). **Invisible heat rays!**





EFGH

A B

C

D



Ritter — in 1801 discovered chemical energy in the portion above the violet (UV).



Red

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Work by Faraday and Maxwell proved light was EM wave in 1865.

field vibration

> $abla \cdot \mathbf{E} = rac{
> ho}{arepsilon_0}$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$



КĻМ





Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared). Invisible heat rays!





EFG



Ritter — in 1801 discovered chemical energy in the portion above the violet (UV).



ĸĻM

Green

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)



Hertz in 1888 confirmed this with discovery of radio waves.



Newton — in 1666 proved white light was made up of many colours.



Herschel — in 1800 discovered heating energy in the portion of light beyond the red (infrared). **Invisible heat rays!**





EFG



Ritter — in 1801 discovered chemical energy in the portion above the violet (UV).



KLM

Green Blue Indige Violet

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







radio waves

 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$



x-rays

 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

Hertz in 1888 confirmed this with discovery of radio waves.



Röntgen later produced X-rays in 1895.









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

I	1 n	nil	1	μ	1	I	1 n 	m	1 A	1	1	pm I
0-4	1	10-5	1() -6	10-7	7 10-	⁸ 10	-9	10-1	⁰ 10 [.]	⁻¹¹ 1 ()-12
Z		l	I	1	PHz	I	I	1 E	Hz	I	I	1 ZHz
2	1() 13	1014	Ļ -	10 ¹⁵	10 ¹⁶	1017	1() ¹⁸	10 ¹⁹	1020	10 ²¹
nert	ertz Infrared				Ultı		Х	Ga	Gamma			
ဂ္ဂ	Far	' IR <mark>Mi</mark>	d IR	lear IR	Near UV E	xtreme U	/ So	oft X-ra	У	Hard X-	ray	
optic		Vis 002	w eldia	vave 225	length	470 si 440 (uu)						



З



Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

I	1 n	nil	1	μ	1	I	1 n 	m	1 A	1	1	pm I
0-4	1	10-5	1() -6	10-7	7 10-	⁸ 10	-9	10-1	⁰ 10 [.]	⁻¹¹ 1 ()-12
Z		l	I	1	PHz	I	I	1 E	Hz	I	I	1 ZHz
2	1() 13	1014	Ļ -	10 ¹⁵	10 ¹⁶	1017	1() ¹⁸	10 ¹⁹	1020	10 ²¹
nert	ertz Infrared				Ultı		Х	Ga	Gamma			
ဂ္ဂ	Far	' IR <mark>Mi</mark>	d IR	lear IR	Near UV E	xtreme U	/ So	oft X-ra	У	Hard X-	ray	
optic		Vis 002	w eldia	vave 225	length	470 si 440 (uu)						



З



Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





























Solid-state technology











Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

Solid-state technology












Broken symmetries and spectroscopy





$$\frac{d}{dt} \stackrel{P}{\longrightarrow} \epsilon(t)$$

$$\frac{d}{dt} \stackrel{M}{\longrightarrow} \chi_{t}$$





Broken symmetries and spectroscopy









Broken symmetries and spectroscopy









Current projects (FWF)



Dr. David Szaller

Quantum-optical phenomena in magnetoelectric crystals







Dr. Evan Constable

Emergent Electrodynamics in Frustrated Magnets





Dr. Alexey Shuvaev

Terahertz magnetooptics of Dirac fermions



https://www.ifp.tuwien.ac.at/spectroscopy/projects



Prof. Andrei Pimenov

Electric control of the optical magnetoelectric effect in multiferroics









Bachelor project of Sahra Black







Bachelor project of Sahra Black



$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\frac{\omega}{\tau}} + \sum_j \frac{\omega_j}{\omega}$$





Bachelor project of Sahra Black







Bachelor project of Sahra Black





phonons

$$\frac{\Delta \epsilon_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$







Bachelor project of Sahra Black



$$\frac{\Delta \epsilon_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$

dielectric response function 1000 ---- Fe₂VAI 500 0 ω -500 -1000 10^{2} 10^{3} 10 1000 🛓 - Fe₂VAI 100 \mathbf{S}_{2} 10 10³ 10² 10 Frequency (cm⁻¹)







Bachelor project of Sahra Black



$$\frac{\Delta \epsilon_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$

dielectric response function







Bachelor project of Sahra Black



$$\frac{\Delta \epsilon_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}$$

dielectric response function







Bachelor project of Sahra Black







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

















Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

e of









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)



































broken time-reversal symmetry

broken **space-inversion** symmetry







broken time-reversal symmetry

broken **space-inversion** symmetry







Examples

GdMnO₃ TbMnO₃ HoMnO₃





















































broken time-reversal symmetry

broken **space-inversion** symmetry

Antiferromagnetic order



Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)
















Antiferroelectrics





Antiferroelectrics







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)





frustrated 6-fold degeneracy

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







frustrated 6-fold degeneracy

Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)



New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity











Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)



New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing











New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing











New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing











New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing











New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing











New Physics

Spin liquids, spin ices

Fractionalised excitations: magnetic monopoles

Novel emergent complexity

Applications

Spintronics

Quantum computing







Frustrated magnetism: spin ice





Frustrated magnetism: spin ice











Frustrated magnetism: spin ice













Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)









Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







































Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)
























Magnetic monopoles



Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)







Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

Do magnetic monopoles carry electric dipoles?











Evan CONSTABLE (evan.constable@tuwein.ac.at)

Do magnetic monopoles carry electric dipoles?



















Solid-state spectroscopy group (IFP)

https://www.ifp.tuwien.ac.at/spectroscopy/home/



Group leader

Prof. Andrei Pimenov pimenov@ifp.tuwien.ac.at



Multiferroics & Frustrated Magnetism

Dr. Evan Constable evan.constable@tuwien.ac.at

Metamaterials & Magneto-optics

Dr. David Szaller david.szaller@tuwien.ac.at

Magneto-optics of quantum 2-D systems

Dr. Alexey Shuvaev shuvaev@ifp.tuwien.ac.at





17