

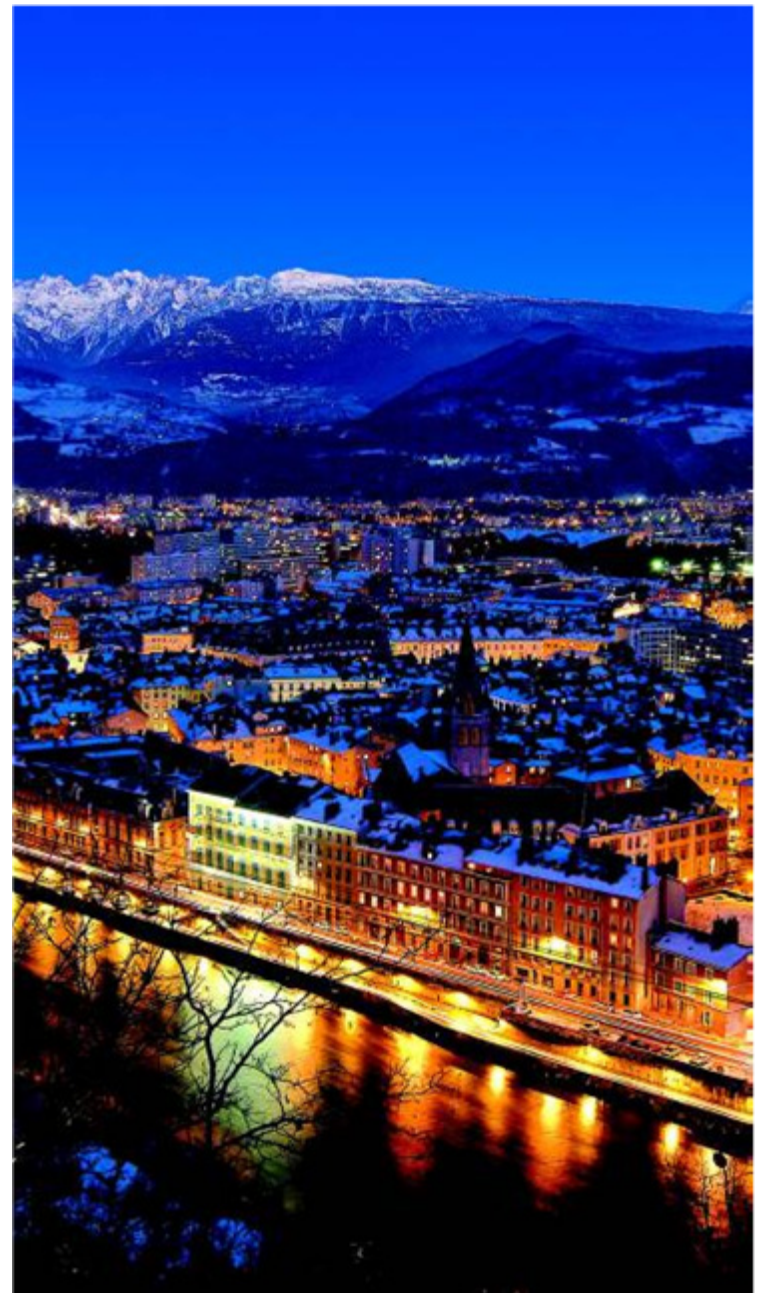
^3He liquide 2D

*Un liquide de Fermi
fait pour intriguer les
physiciens*

Henri Godfrin

Groupe Ultra-basses températures

Institut Néel - CNRS -Grenoble



Plan de l'exposé

- Les fluides quantiques
- L' ^3He liquide et la théorie de Landau des Liquides de Fermi
- La dynamique: zéro-son et paramagnons
- L' ^3He liquide bidimensionnel: diagramme de phases et propriétés thermodynamiques
- Nouveaux effets dynamiques: modes collectifs à vecteur d'onde élevés

L'hélium

- Deux isotopes : ${}^4\text{He}$ et ${}^3\text{He}$
- Couche électronique 1s complète : gaz rare, pas de chimie!
- ${}^3\text{He}$ est un « Fermion » : spin = spin nucléaire = $\frac{1}{2}$
- ${}^4\text{He}$ est un « Boson » : spin total = 0
- Existent en phase solide ou liquide, suivant P et T
- Systèmes-modèle : L'étude de l'hélium permet de vérifier les théories quantiques de la Matière Condensée
(Fermions ou Bosons en interaction)

^4He et ^3He : vers le monde quantique !

- En phase condensée, on observe **deux types** différents d'**effets quantiques** :
- L'**énergie de point zéro** : principe d'incertitude de Heisenberg :
 $\delta x \cdot \delta p \sim \hbar$

localisation \rightarrow grande énergie cinétique

- La **statistique quantique** : quand la séparation entre atomes devient de l'ordre de la longueur d'onde de de Broglie,

$$\lambda \sim h / (mE)^{1/2} ,$$

Bosons et Fermions montrent des comportements différents

N.B. : $\lambda \sim 1 \text{ nm} @ 4 \text{ K}$

Potentiel d'interaction entre atomes d'hélium

Interaction faible

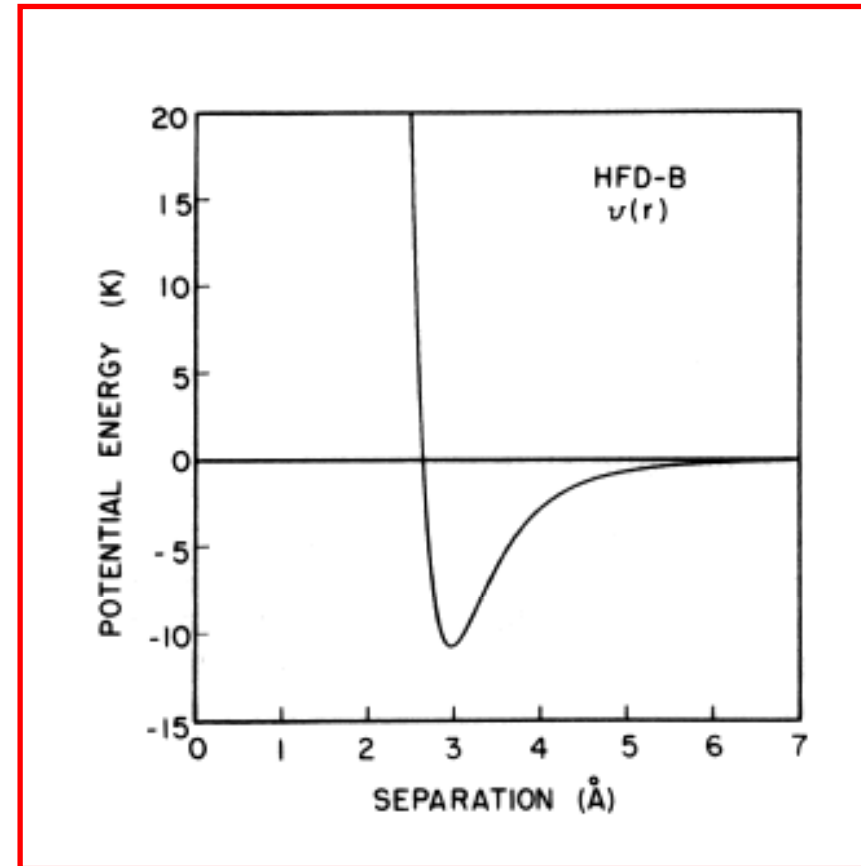
(van der Waals)

Potentiel de Lennard-Jones

(«6-12 »)

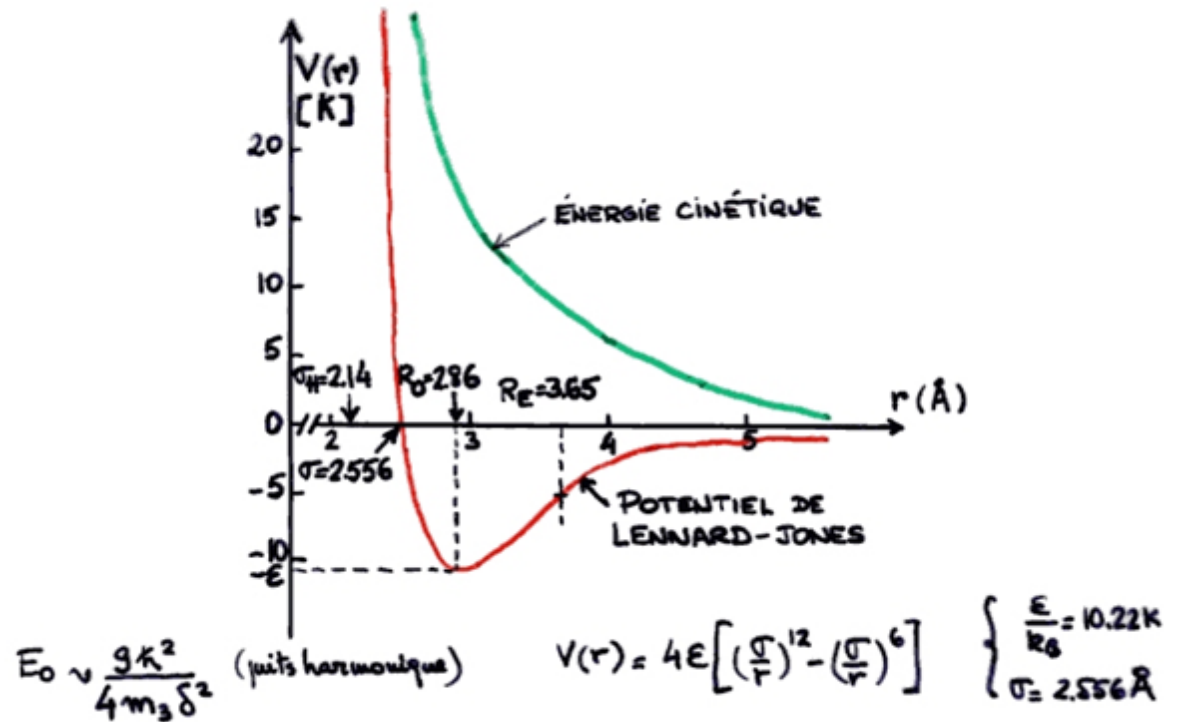
Ou, de manière plus réaliste,

Potentiel d'Aziz (Mol. Phys. 61,
1487, 1987) :



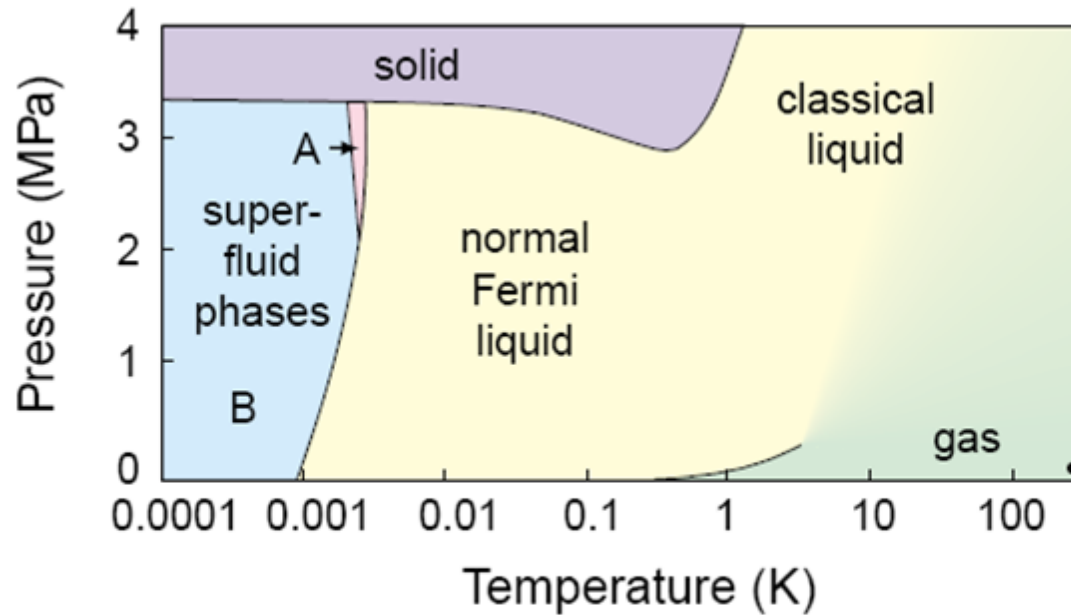
Le cas de l'³He

- énergie cinétique comparée à l'énergie potentielle, pour des atomes d'³He



Question : Qu'attendriez vous pour l'⁴He?

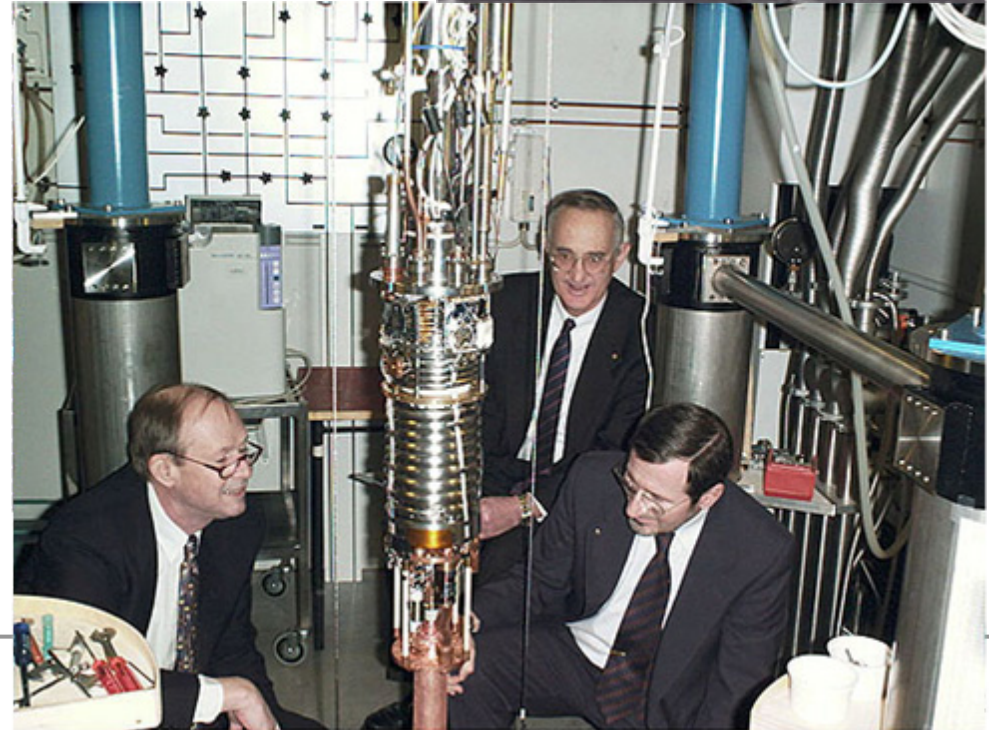
Diagramme de Phases de l'³He



Chercheur perplexe

L'³He liquide

- A haute température, décrit par la théorie de Landau des Liquides de Fermi
- A basse température, transition vers un état superfluide
« non-conventionnel »
Osheroff, Richardson et Lee



La théorie de Landau des Liquides de Fermi appliquée à l'³He

$$C = \gamma T \quad (T \ll T_F)$$

$$\chi = c/T_F^{**}$$

$$\eta \propto T^{-2}$$

$$\kappa \propto T^{-1}$$

« Gaz de Fermi » avec des paramètres renormalisés

Attention : il existe de grandes subtilités dans la théorie !

Voir livre de Nozières et Pines

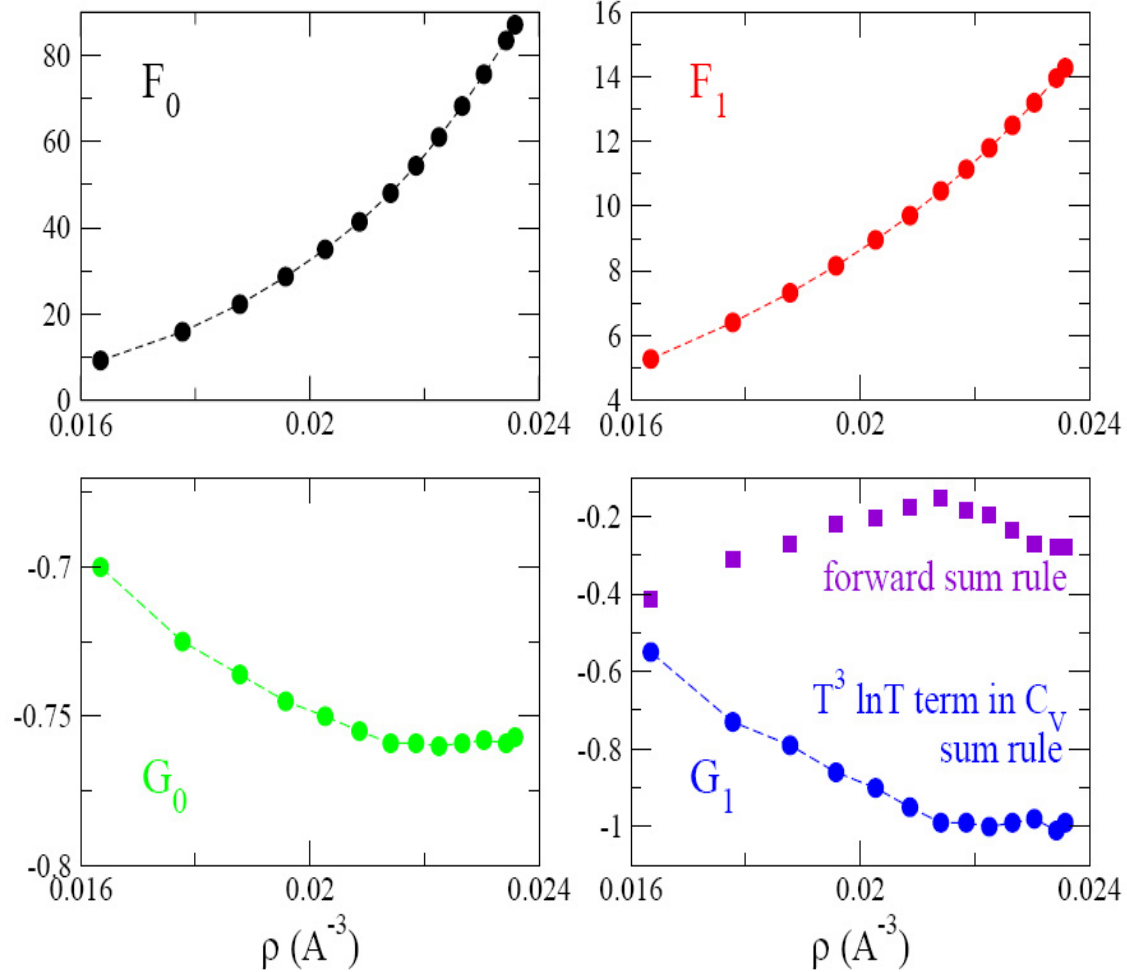
Masse des quasi-particules renforcée

$$C/C_{id} = m^*/m \quad 2,8 \text{ à } 5,8 \text{ avec la pression}$$

$$\text{Magnétisme renforcé} \quad 9,2 \text{ à } 23,7 \text{ avec la pression}$$

$$\frac{C_v}{C_v^{id}} = \frac{m^*}{m} = 1 + \frac{1}{3} F_1^s$$

$$\frac{\chi(0)}{\chi^0(0)} = \frac{m^*}{m} \cdot \frac{1}{1 + F_0^a}$$



Chaleur spécifique de l'³He liquide normal

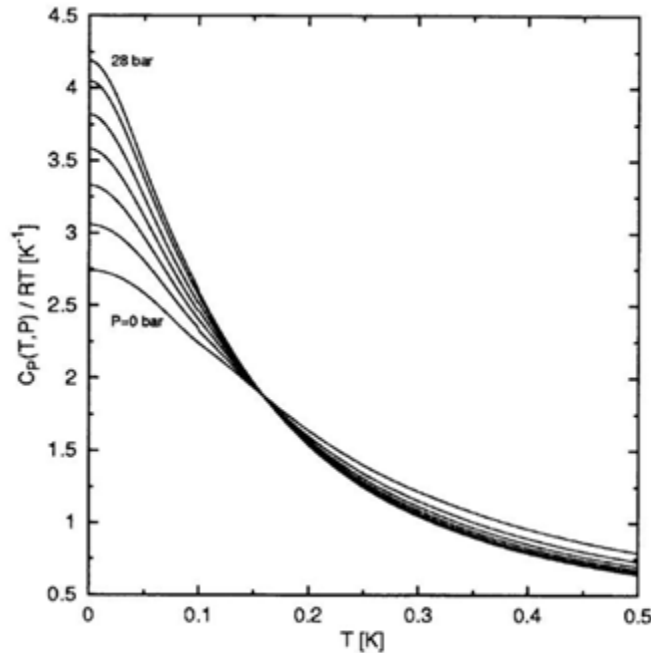


FIG. 5. Specific heat at constant pressure $C_p(T,P)$ divided by temperature vs T at pressures $P=0, 5, 10, 15, 20, 25, 28$ bar. The small kinks at the temperature $T_0=0.1$ K in this and other figures are artefacts caused by the different interpolation formulas (Ref. 16) for $C_V(T,V)$ used below and above T_0 .

Mesures de D.S. Greywall (1983)

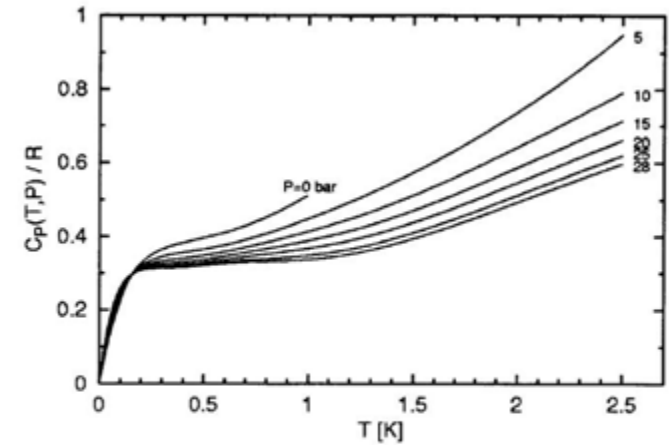


FIG. 6. High-temperature behavior of the specific heat at constant pressure $C_p(T,P)$.

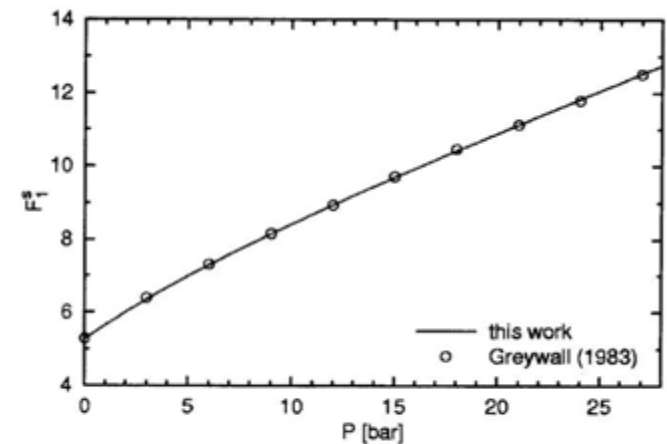
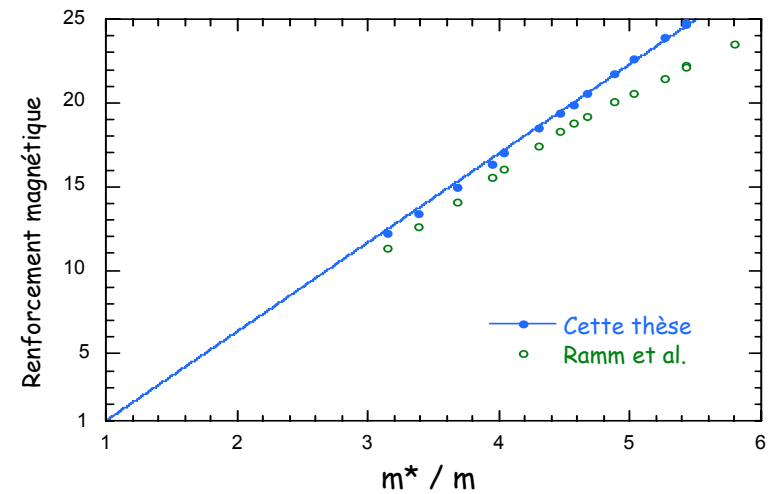
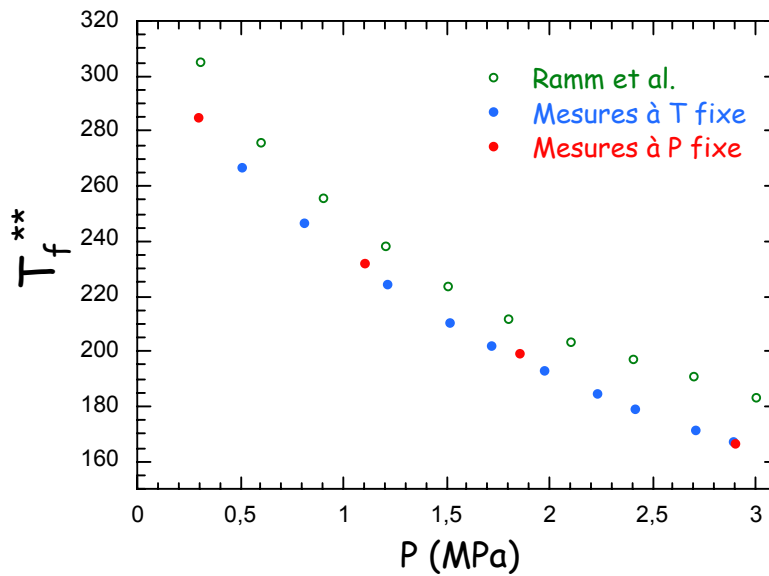
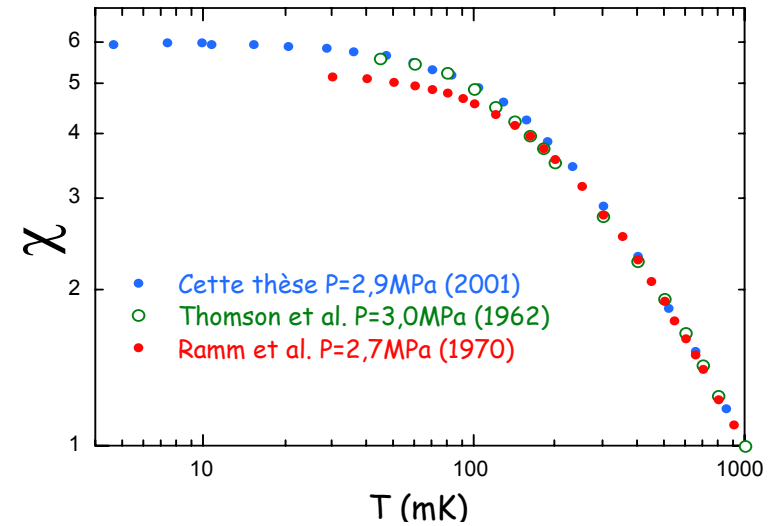
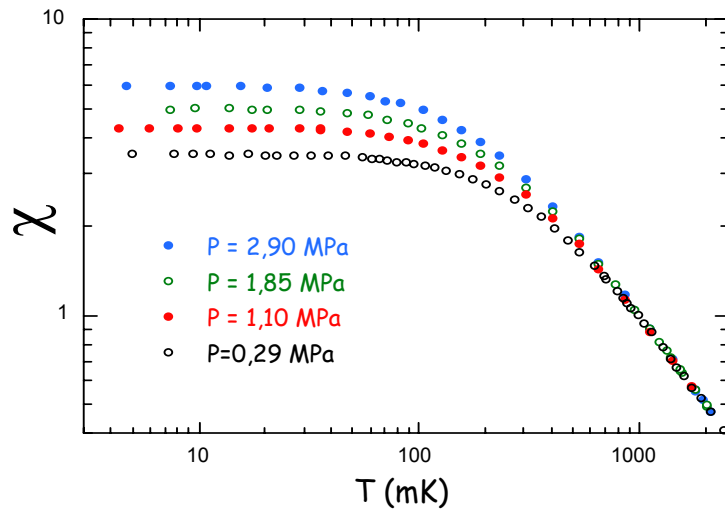


FIG. 9. Fermi-liquid parameter F_1^f vs P , compared to the data obtained by Greywall (Ref. 16).

Susceptibilité magnétique de l'³He liquide normal

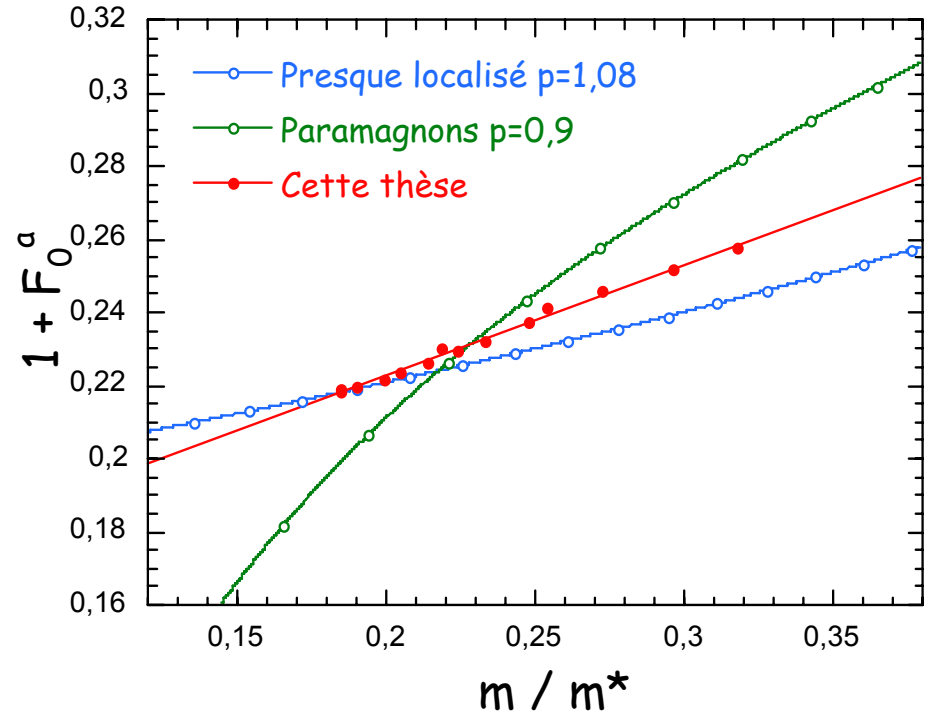


Liquide quasi-localisé ou presque-ferromagnétique ?

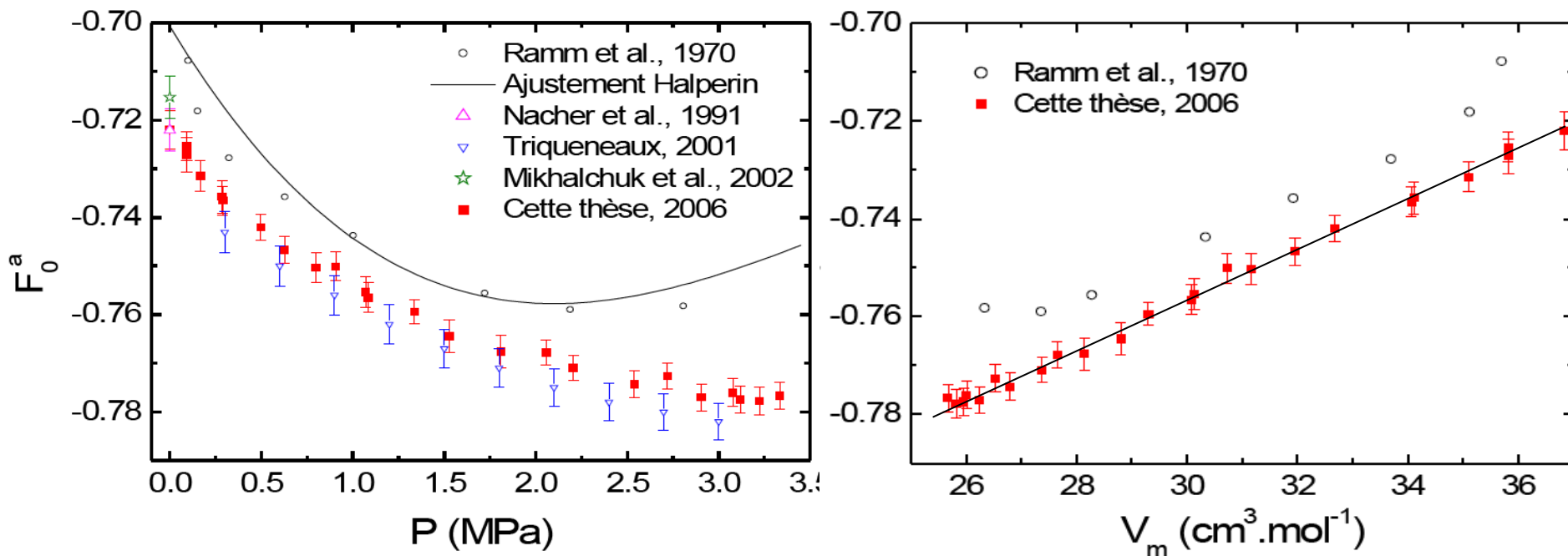
Des modèles « simples » prédisent un comportement différent à très forte densité : divergence de m^* (localisation) ou de $1/(1+F_0^a)$ (ferromagnétisme)

La localisation est privilégiée par ces résultats, mais les deux effets semblent jouer un rôle important

$$\frac{\chi(0)}{\chi^0(0)} = \frac{m^*}{m} \cdot \frac{1}{1+F_0^a}$$



Magnétisme de ^3He Liquide massif



Rien de particulier à $F_0^a = -0.75$!

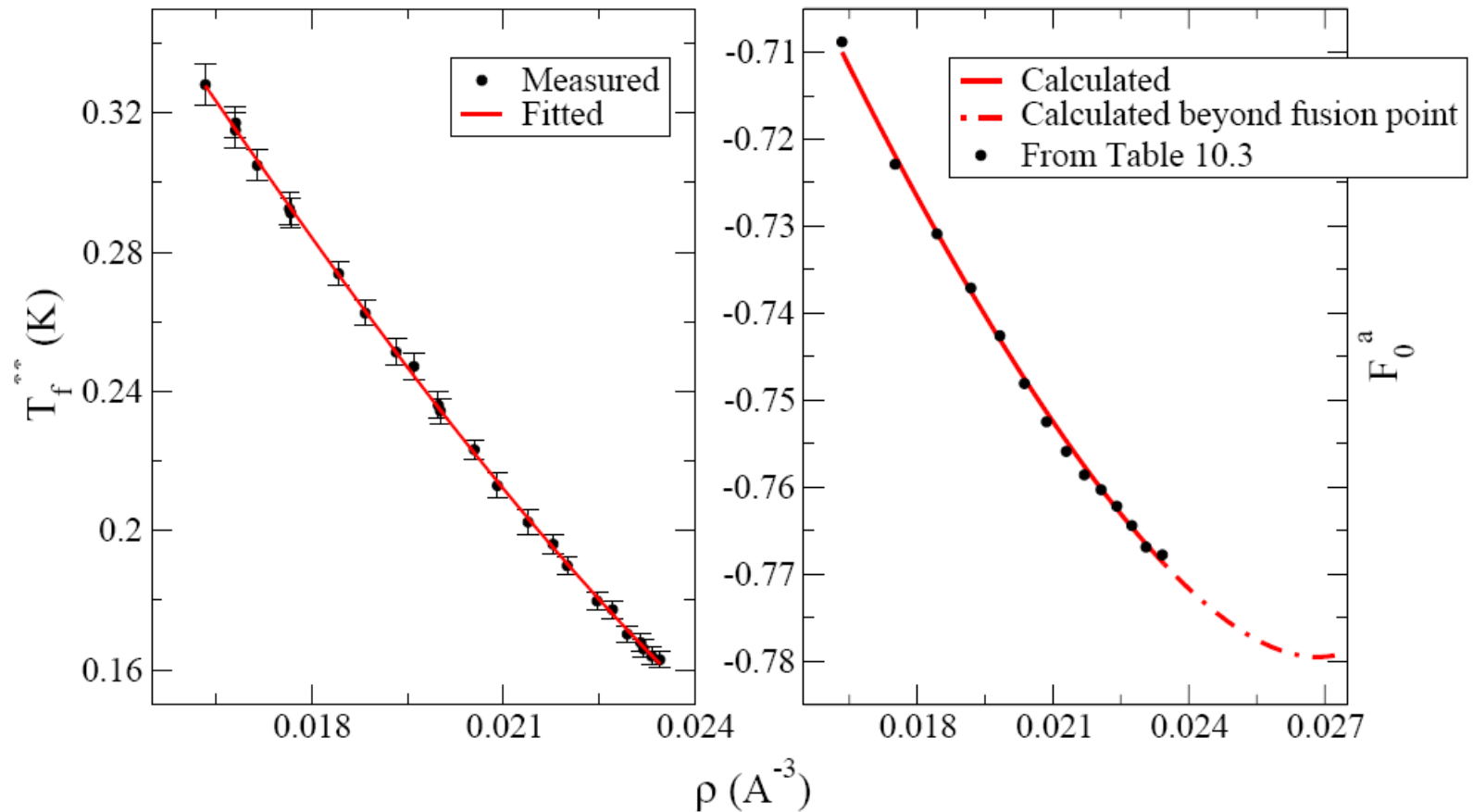


FIG. 6: S2. Left panel: Measured and fitted T_f^{**} . Right panel: Calculated F_0^a . There is now a good agreement for F_0^a .

Zéro-Son

- Théorie du Liquide de Fermi :
 - Valable à basse T and faibles Q et ω
 - Surface Fermi : excitations particule-trou
 - Modes collectifs de densité et densité de spin
- Son sans collisions : Zéro-son
 - $\omega\tau \gg 1$ (**interactions** auto-consistantes!)
 - Oscillations de la surface de Fermi
 - “Plasmons” dans les systèmes électroniques

LONGITUDINAL SOUND AND ZERO SOUND 91

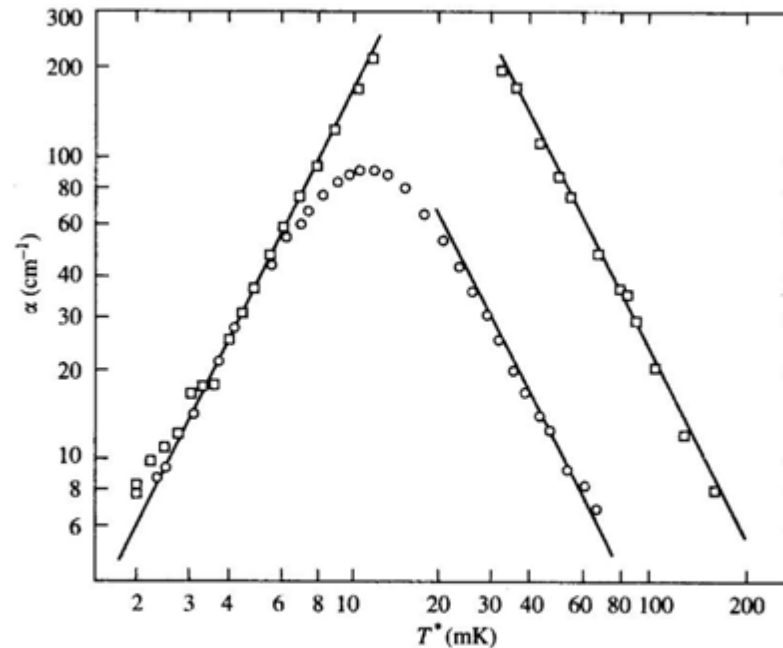


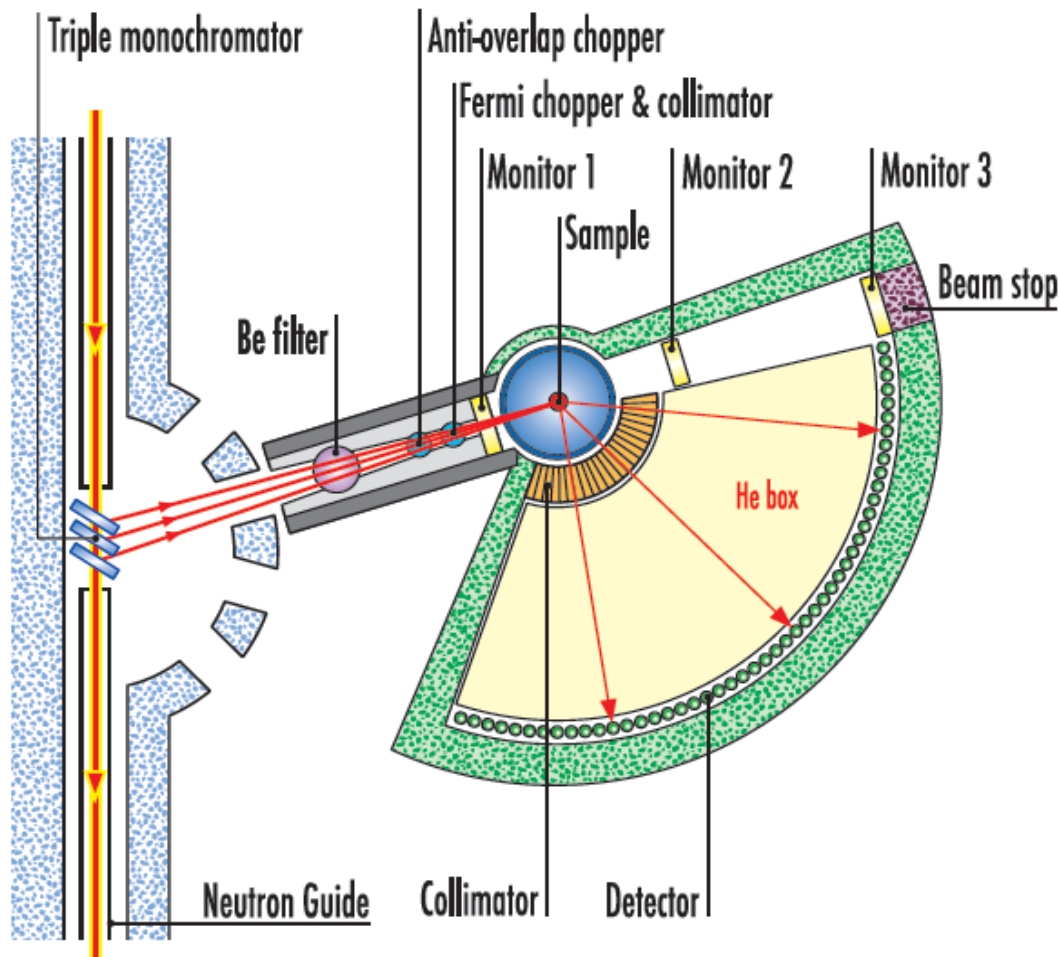
Fig. 5.4 Temperature dependence of the longitudinal acoustic attenuation (α) in liquid ^3He at $p = 32$ kPa measured at both 15.4 MHz (\circ) and 45.5 MHz (\square). The line through the data at low temperatures shows $\alpha \sim T^2$, while those through the data at high temperatures follow $\alpha \sim \omega^2 T^{-2}$, in agreement with theory (after Abel *et al.* 1966a).

Abel, Anderson and Wheatley, Phys. Rev. Lett. **17**, 74 (1966)

Diffusion inélastique de neutrons

Temps de vol

Instrument layout



monochromator

composite, vertically focusing
pyrolytic graphite crystals

Incident wavelength in Å	4.1, 4.6, 5.1, 5.9
--------------------------	--------------------

sample

elastic energy resolution

at 4.1 Å	170 μeV
----------	---------

at 4.6 Å	120 μeV
----------	---------

at 5.1 Å	70 μeV
----------	--------

at 5.9 Å	50 μeV
----------	--------

max. energy loss of neutrons	3 meV
------------------------------	-------

max. energy gain of neutrons	200 meV
------------------------------	---------

max. momentum transfer	2.6 Å ⁻¹
------------------------	---------------------

vertical divergence	100 mrad
---------------------	----------

beam size at the sample	3 x 5 cm ²
-------------------------	-----------------------

flux at the sample at 4.1 Å	8.9 x 10 ⁴ n cm ⁻² s ⁻¹
-----------------------------	--

Fermi chopper speed	3000 - 15000 rpm
---------------------	------------------

Be-filter	total thickness 12 cm
-----------	-----------------------

detectors

337 elliptical ³He detectors

sample-to-detector distance	248 cm
-----------------------------	--------

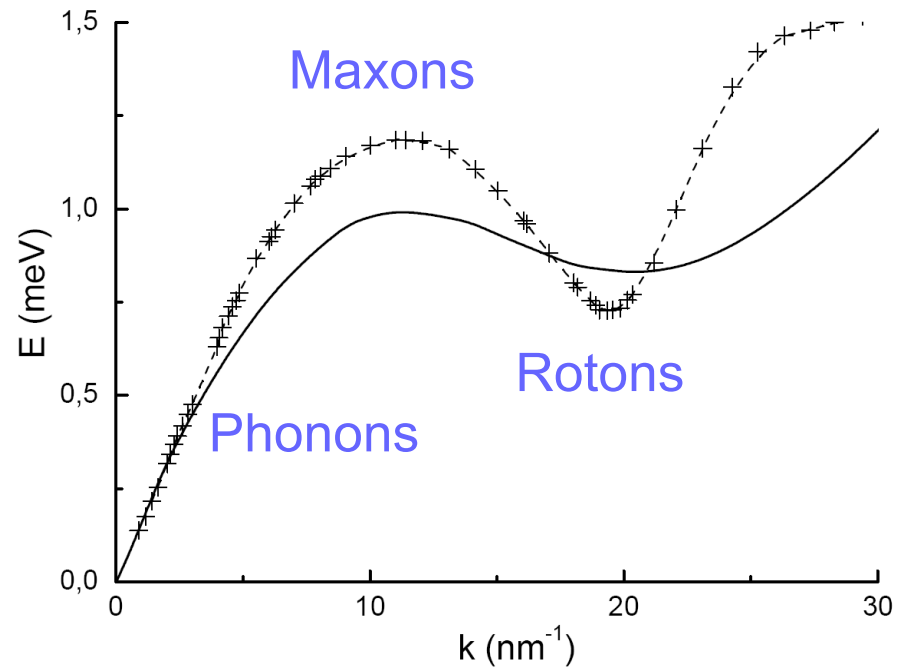
angular range	10° ... 115°
---------------	--------------

vertical detection angle	+/- 15°
--------------------------	---------

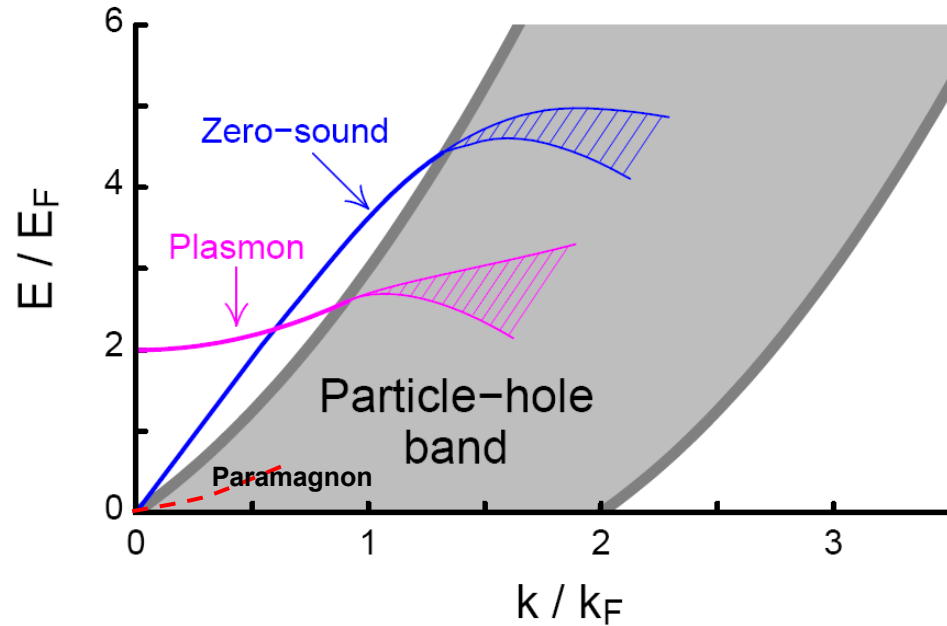
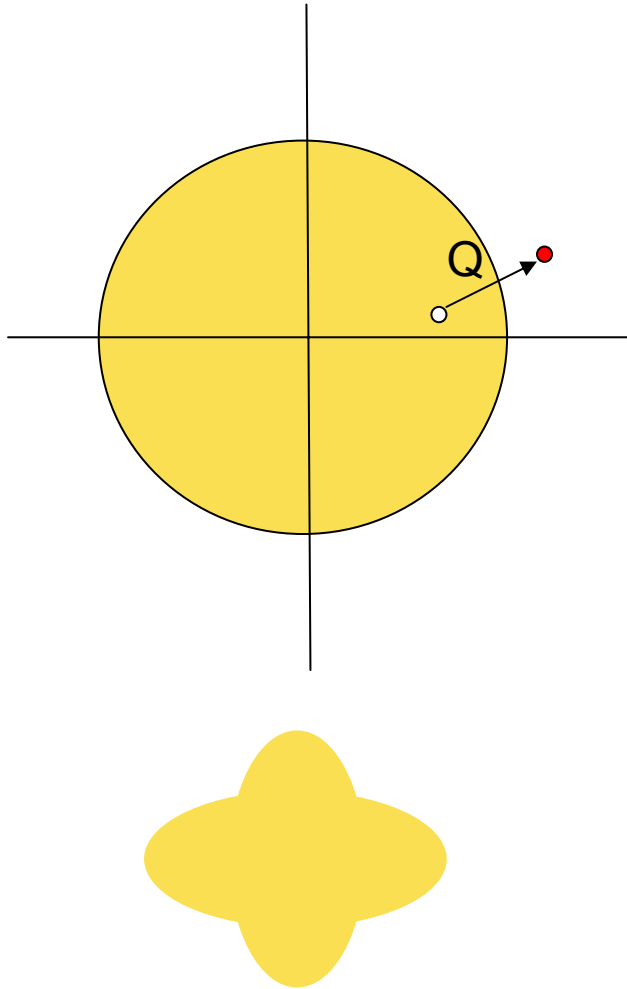
sensitive area	3 m ²
----------------	------------------

total background	4.3 Hz
------------------	--------

Excitations élémentaires de l' ^4He

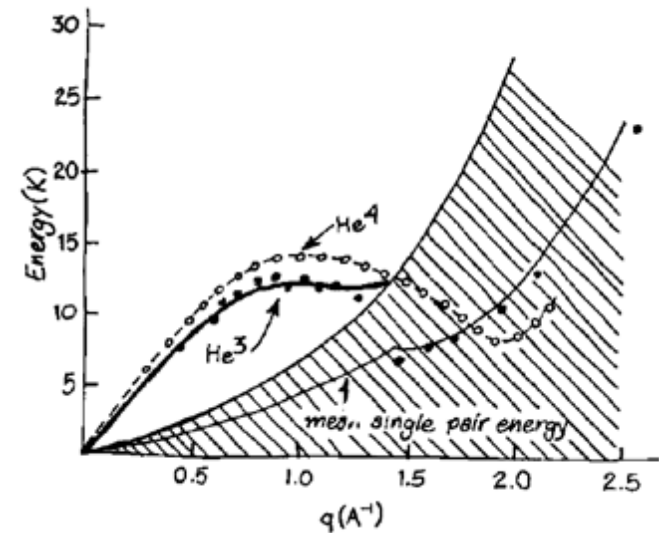
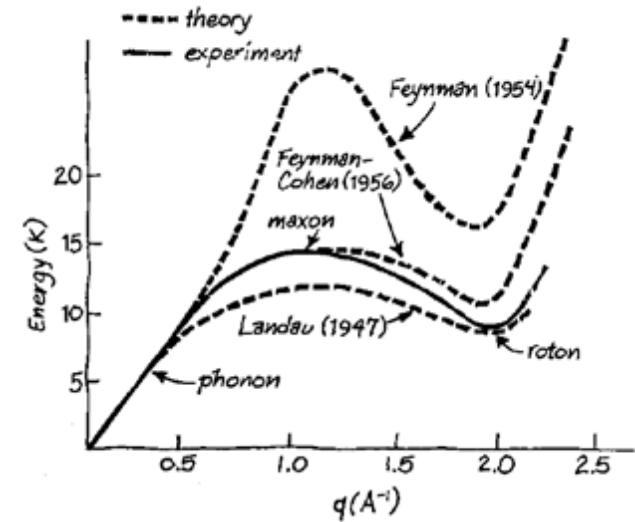


Excitations élémentaires de l'³He

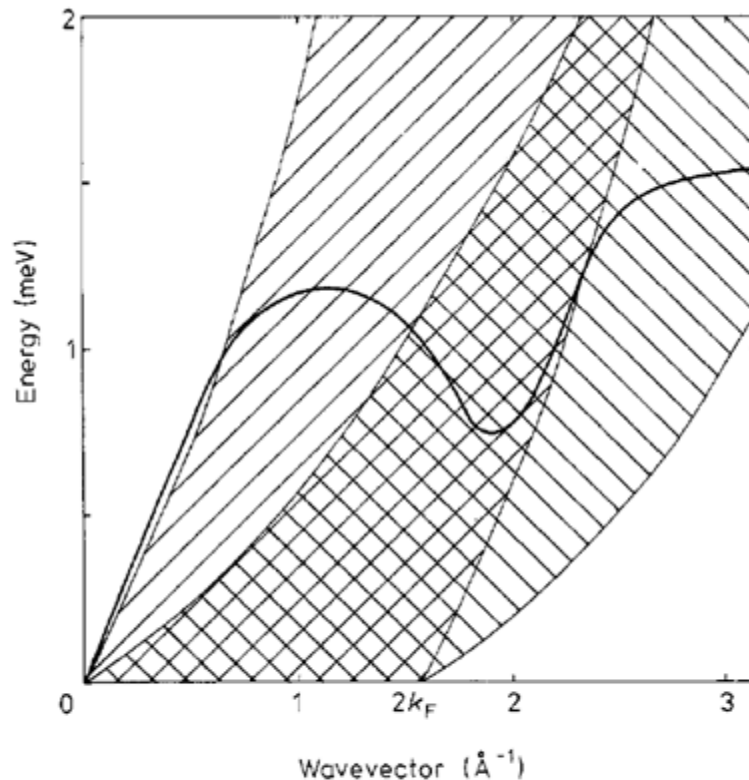


- Description fondamentale en termes de
 - Etat Fondamental
 - **Excitations élémentaires**
- **Bosons:**
 - Etat fondamental superfluide
 - Excitations: modes collectifs, relation de dispersion **phonon-roton**
- **Fermions:**
 - Liquide de Fermi (superfluide à très basse T)
 - **Excitations Particule-trou**
 - **Modes Collectifs**

Voir: Pines & Nozières “*The theory of quantum Liquids*”
 D. Pines, Physics Today 34, 106 (1981)



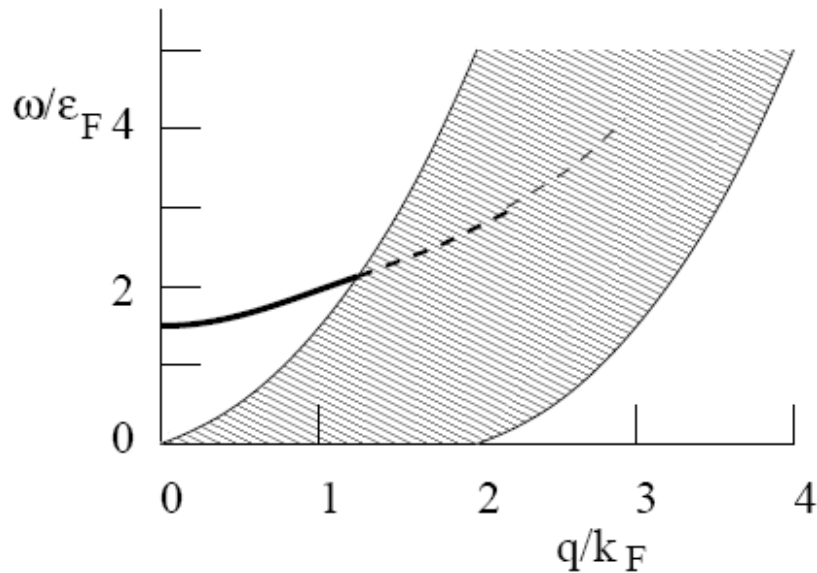
Au-delà de la théorie de Landau : hautes énergies et grands vecteurs d'onde



Excitations
dans
 ^3He et ^4He

Figure 1. The measured dispersion relation for liquid ^4He (Cowley and Woods 1971). The region allowed for single-particle excitations in liquid ^3He is shown both for $M^* = M$ (shading with positive slope) and for $M^* = 3.08 M$ (shading with negative slope).

Plasmons à 3D et 2D



D. Pines, *Elementary excitations in solids*

PHYSICAL REVIEW B 67, 115308 (2003)

Dynamic correlation effects on the plasmon dispersion in a two-dimensional electron gas

A. Yurtsever,¹ V. Moldoveanu,² and B. Tanatar¹

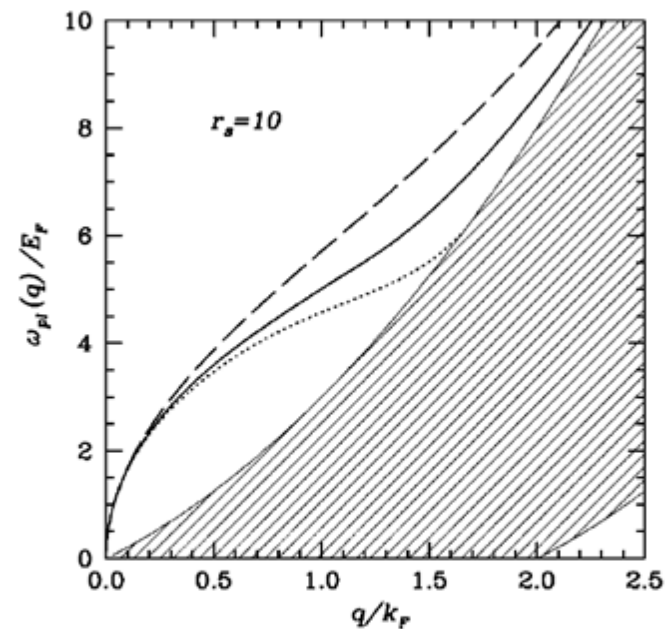
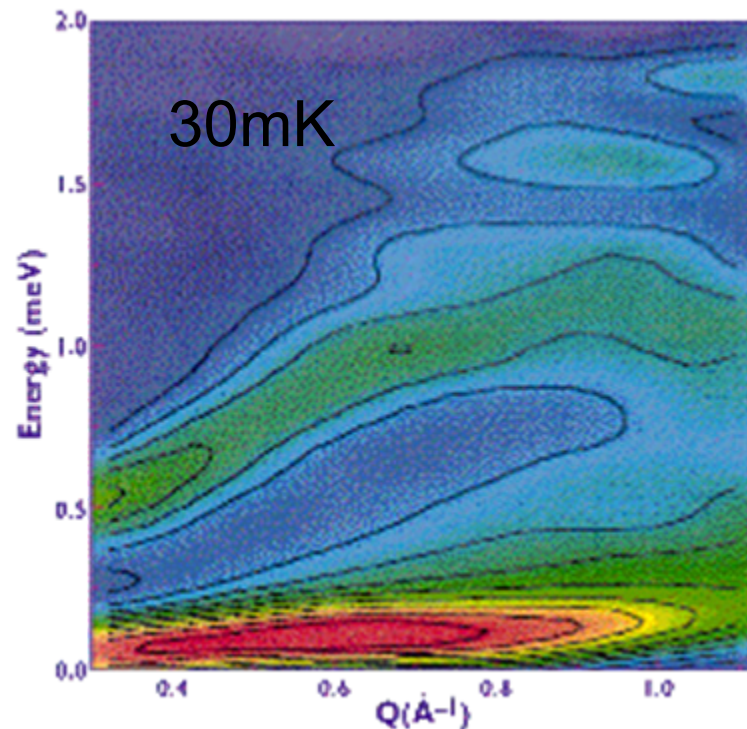
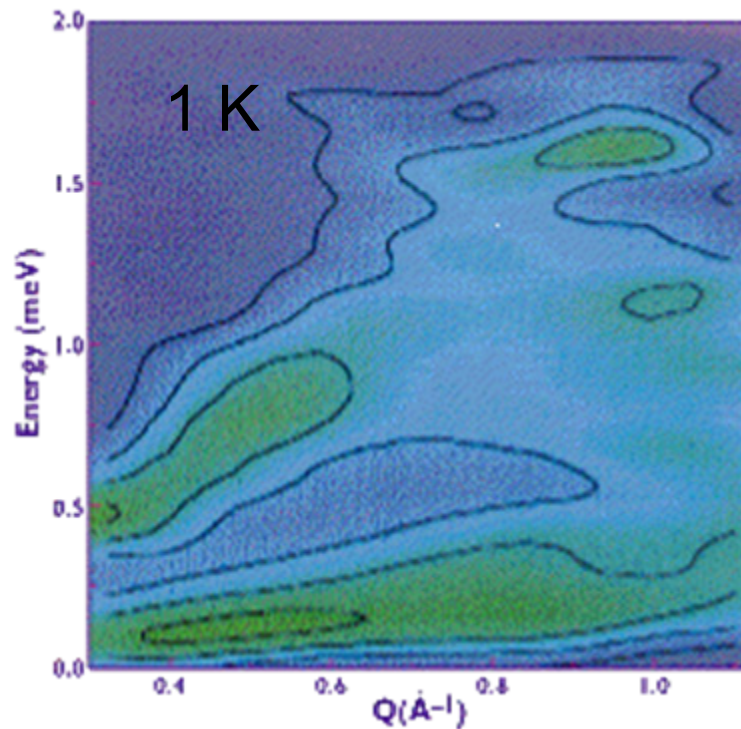


FIG. 1. Plasmon dispersions in a zero thickness 2D electron system at $r_s = 10$ and $T = 0$ as given by various theories. The dashed line indicates the result of RPA, dotted and solid lines indicate results using the static $G(q)$ and dynamic $G(q, \omega)$, respectively as explained in the text. The shaded region is the particle-hole continuum.

Zéro-son dans ^3He liquide neutrons : $S(q,\omega)$

Effective mass, spin fluctuations, and zero sound in liquid ^3He

H. R. Glyde, B. Fak, N. H. van Dijk, H. Godfrin, K. Guckelsberger and R. Scherm
Phys. Rev. B 61,1421 (2000)



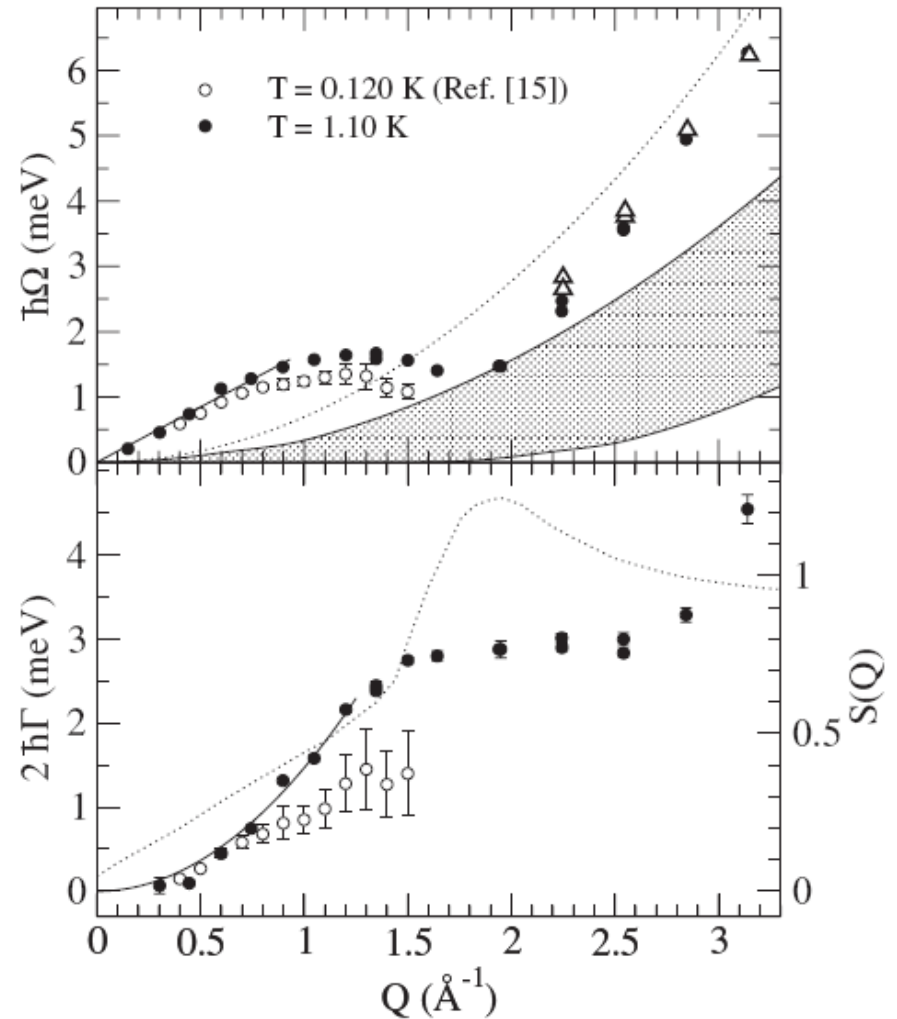
Des mesures de diffusion inélastique de X semblent contredire ces résultats: le mode de Zéro-son ne rentrerait pas dans la bande particule-trou...

Zero Sound Mode in Normal Liquid ^3He

F. Albergamo, R. Verbeni, S. Huotari,
G. Vankó, and G. Monaco*

*European Synchrotron Radiation Facility,
BP 220, 38043 Grenoble Cedex, France*

PRL **99**, 205301 (2007)



Mais le mode de zéro-son est bien englouti!

Comment on “Zero Sound Mode in Normal Liquid ^3He ”

Alexander J. M. Schmets^{1,2} and Wouter Montfrooij¹

1) Department of Physics and Missouri Research Reactor
University of Missouri

Columbia, Missouri 65203, USA

2) Reactor Institute Delft

Technical University of Delft

2629 JB Delft, The Netherlands

PRL **100**, 239601 (2008)

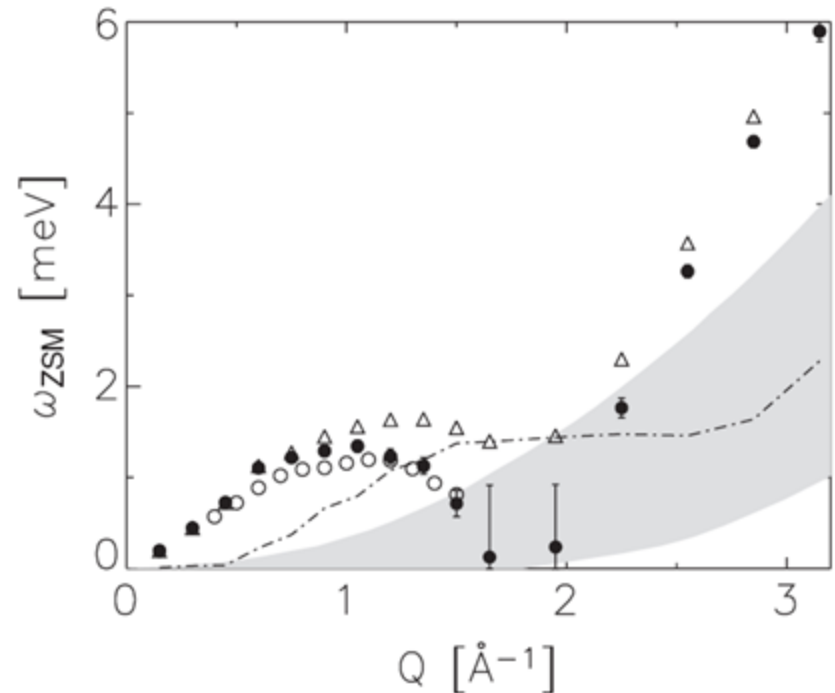


FIG. 1. The propagation frequency ω_{ZSM} of the zero sound mode in ^3He (x-ray [1]: filled circles; neutron [2]: open circles). In the region of the particle-hole continuum (shaded area) the damping Γ (dashed line) becomes comparable to Ω (triangles) and the ZSM undergoes considerable softening. The error bars are based on the size of the symbols in Fig. 3 in Ref. [1].

^3He liquide bidimensionnel

- Quel intérêt ?
 - Même topologie...
 - Mais différents paramètres!
- Peut-on le réaliser expérimentalement ?
 - Adsorption physique sur substrats solides
- Comment mesurer quelque chose ?
 - Chaleur spécifique
 - Propriétés magnétiques
 - Excitations élémentaires

Le graphite exfolié

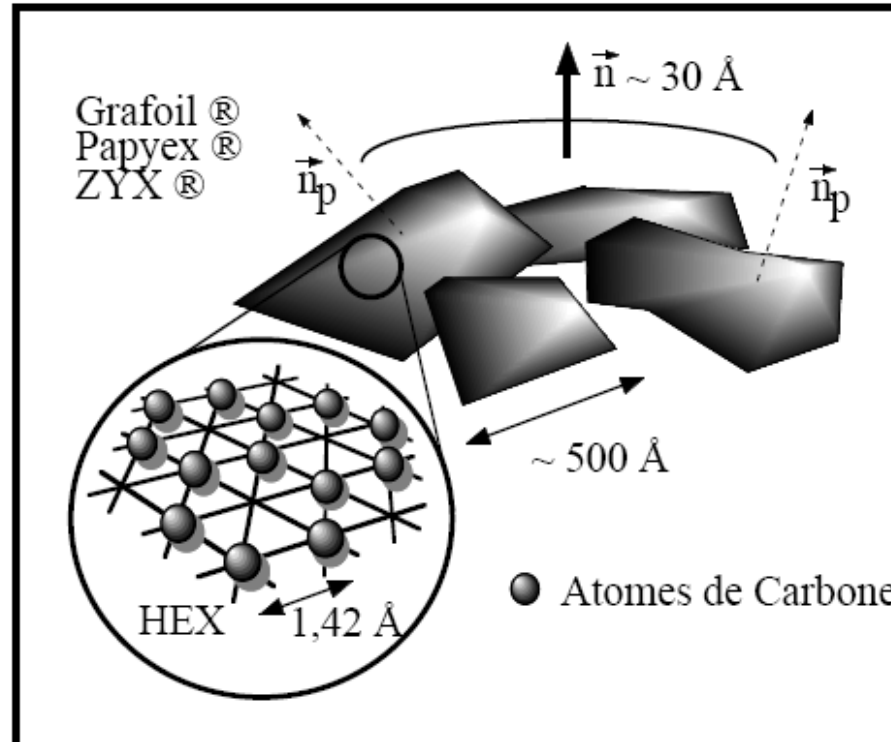
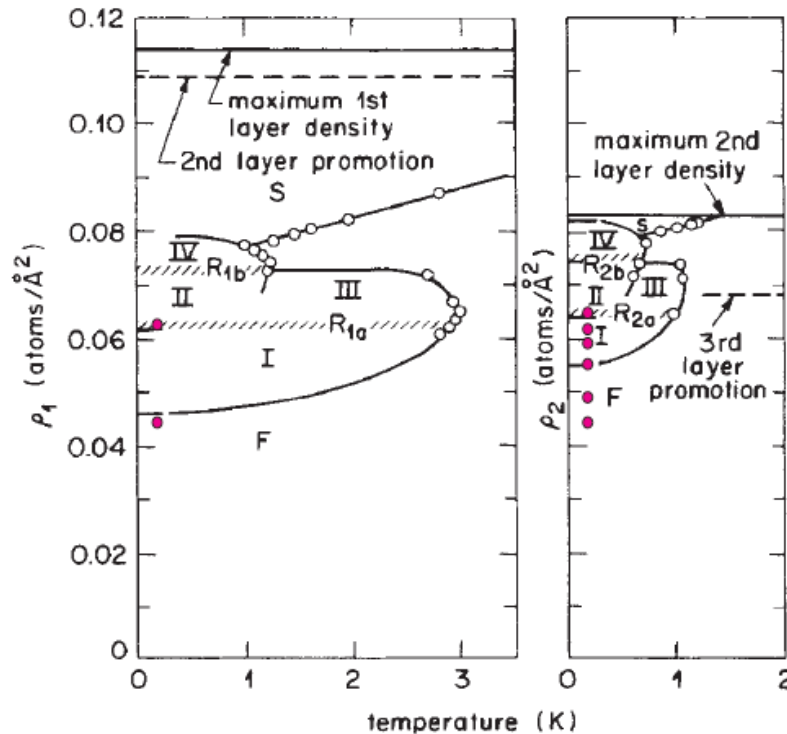


FIG. 7.2: Vue schématique d'un échantillon de Grafoil, Papyex ou ZYX. Les plaquettes de graphite (empilement hexagonal de Carbone) ont une taille moyenne de 500 \AA . Leurs normales \vec{n}_p sont orientées, avec une dispersion de 30° environ, suivant la normale \vec{n} aux feuilles.

Diagramme de phases de ^3He 2D: densités étudiées

1ère couche



2ème couche

The Phase diagram [D.S. Greywall PRB 41(1990)1842] for ^3He adsorbed on graphite for the first and second layer obtained by heat capacity measurements. It shows a wide range of possible densities for 2D Liquid up to 6 atoms /nm². The 2nd layer was more intensively investigated, because it allows higher liquid densities and the influence of the substrate is partly suppressed by the first layer. The red points indicate investigated coverages.

Densité (solide): neutrons

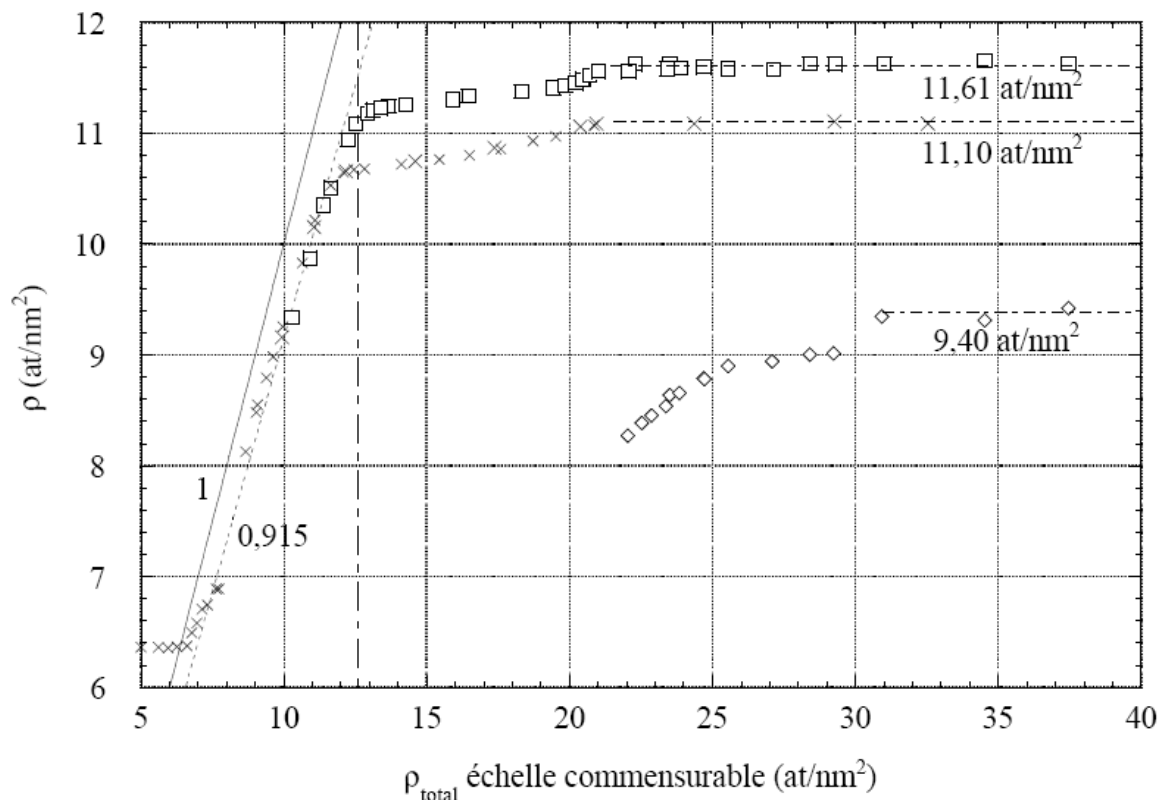


FIG. 7.11: Mesures de diffraction de neutrons obtenues par Schildberg [197] 1988. L'échelle de taux de couverture ρ_{total} est fournie en échelle commensurable. En première couche : \times pour l'³He, et \square pour l'⁴He. Les droites pleines et pointillées, passant par l'origine, distinguent la surface commensurable S_{com} de la surface incommensurable S_{incom} . Leurs pentes sont indiquées sur le graphique. Verticale tiretée : elle marque la quantité nécessaire à la complétion de la première couche d'⁴He. Également représenté, mesure en seconde couche : \diamond pour l'⁴He. Ces derniers points sont discutés en sous-section 7.8.2 suivante.

Two-dimensional Fermi liquid in the highly correlated regime: The second layer of ^3He adsorbed on graphite

K.-D. Morhard, C. Bäuerle, J. Bossy, Yu. Bunkov, S. N. Fisher, and H. Godfrin
*Centre de Recherches sur les Très Basses Températures, Centre National de la Recherche Scientifique,
Boîte Postale 166, 38042 Grenoble Cedex 9, France*

(Received 13 September 1995)

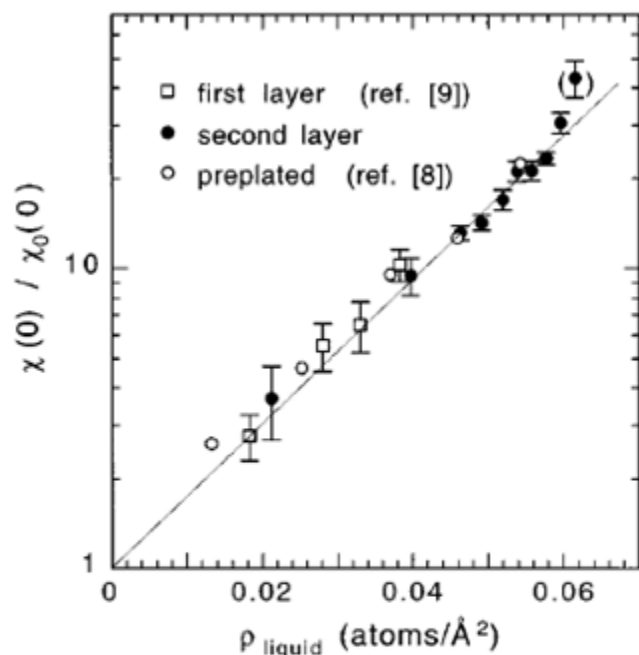


FIG. 3. Susceptibility enhancement as a function of the liquid density; filled circles: this work; open squares: ^3He on graphite (Ref. 9); open circles: ^3He on ^4He preplated graphite (Ref. 8).

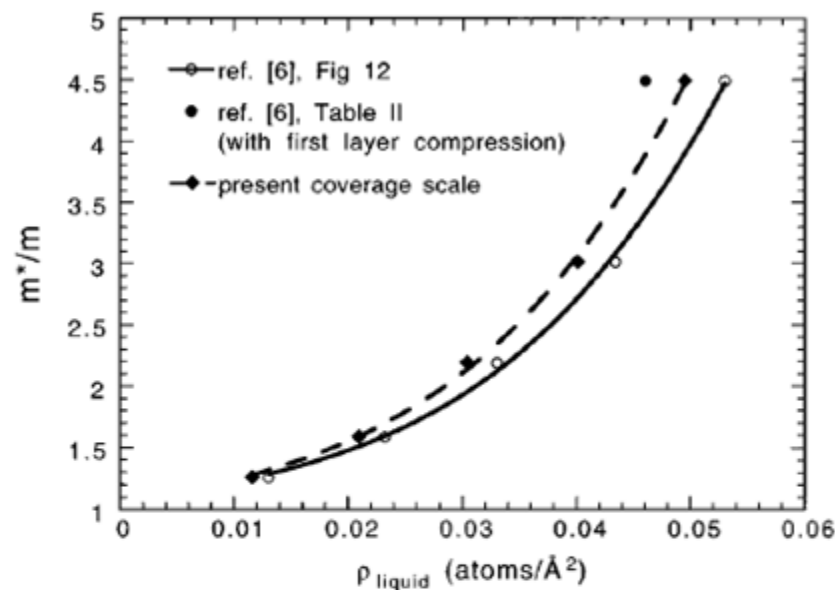


FIG. 4. Reduced effective mass as a function of the second layer density. Open circles: data from Ref. 6; filled circle: represents the estimated coverage correction due to the compression of the first layer as given in Table II in Ref. 6; filled diamonds: same heat-capacity data as a function of the areal density of the second layer determined in the present work.

A 2D, on explore une gamme de densité très importante!

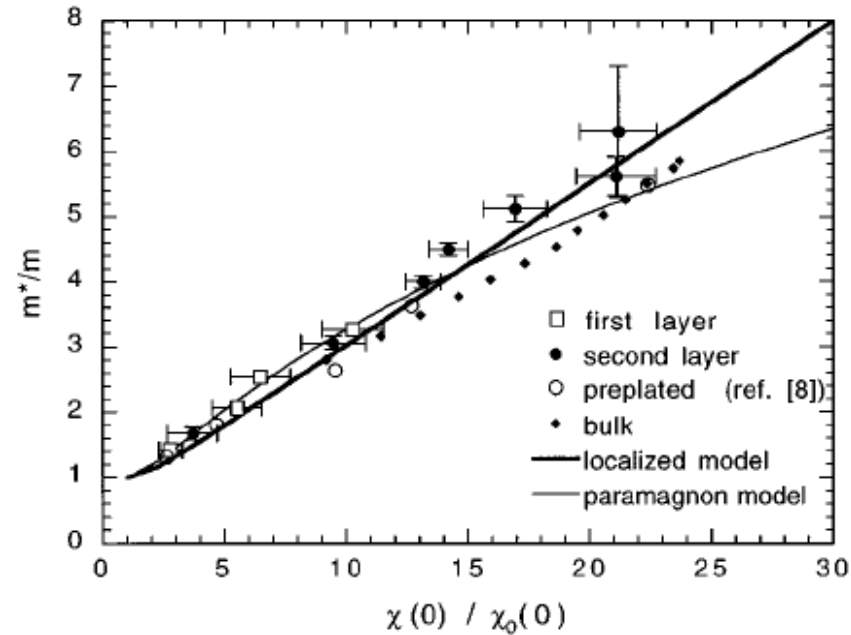
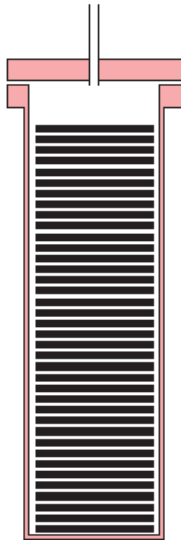


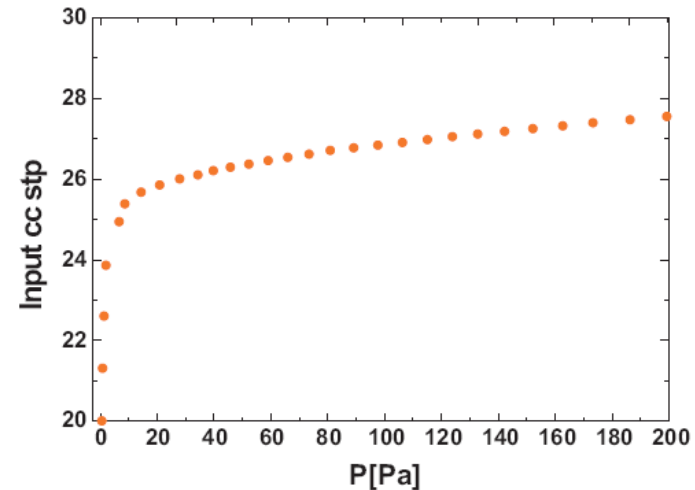
FIG. 5. The reduced effective mass as a function of the susceptibility enhancement; filled circles: this work; open squares: ^3He on graphite (Ref. 9); open circles: ^3He on ^4He preplated graphite (Ref. 8); filled diamonds: bulk ^3He (Ref. 3). The thick line corresponds to the quasilocated model (Ref. 17), and the thin line to the paramagnon model (Ref. 16). Our susceptibility enhancement factors larger than 22 cannot be represented in this plot due to the lack of heat-capacity data. Note that for these points very different effective masses are predicted by the different models.

Premières mesures de diffusion inélastique de neutrons sur ^3He 2D Liquide de Fermi

Henri Godfrin , Hans Lauter , Matthias Meschke



Schematic view of the sample container filled with sheets of ZYX graphite.



Characterization of the surface area of the investigated sample with an isotherm measured at $T=4.2$ Kelvin with ^4He :
The total area was found to be 60 m^2

^3He adsorbé sur graphite exfolié ZYX ($\xi=190 \text{ nm}$)

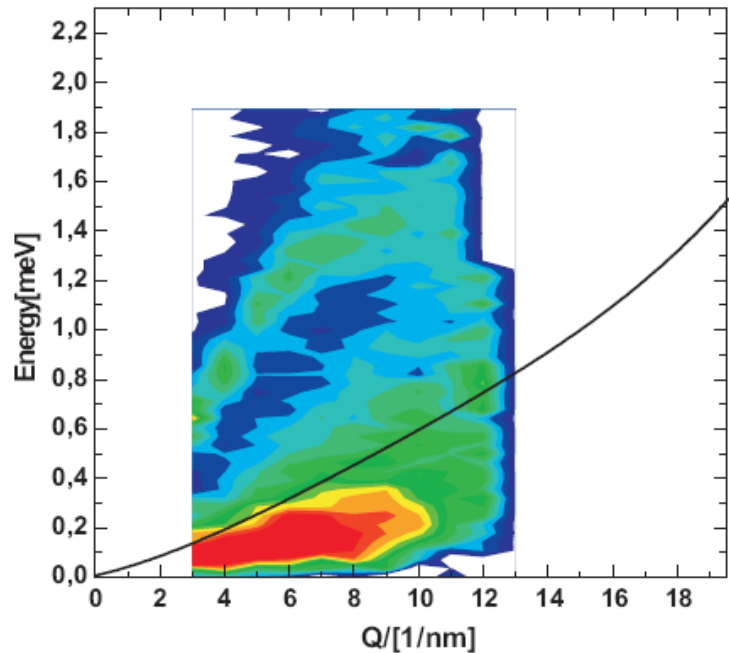
Mesures réalisées à l'ILL sur le spectromètre à temps de vol IN6 avec une longueur d'onde de 0.512 nm

Comparaison entre les données

à 3D

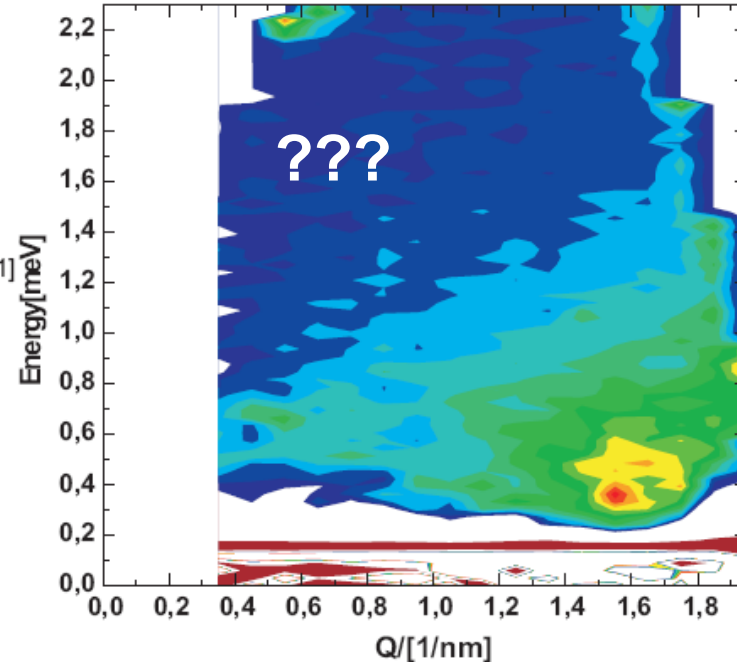
et

à 2D



BULK

T=100 mK
[Glyde,
Fak,Dijk,
Godfrin,
Guckelsberger,
Scherm
PRB 61(2000)1421]

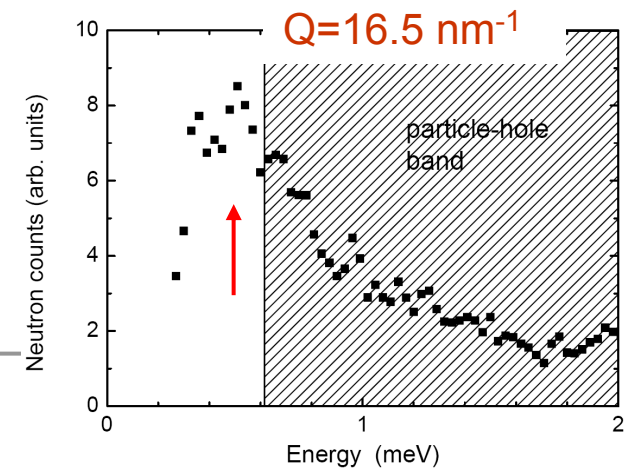
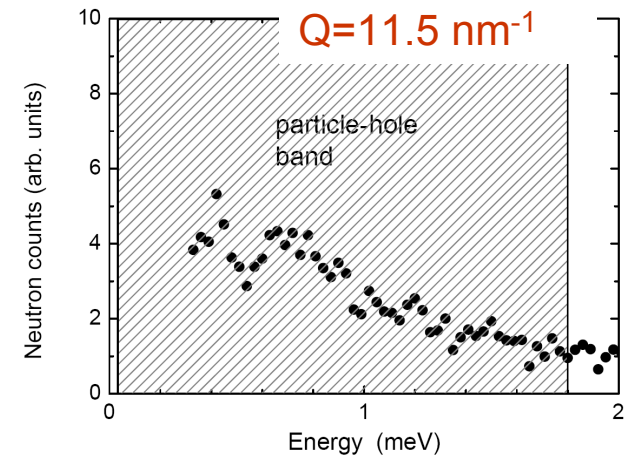
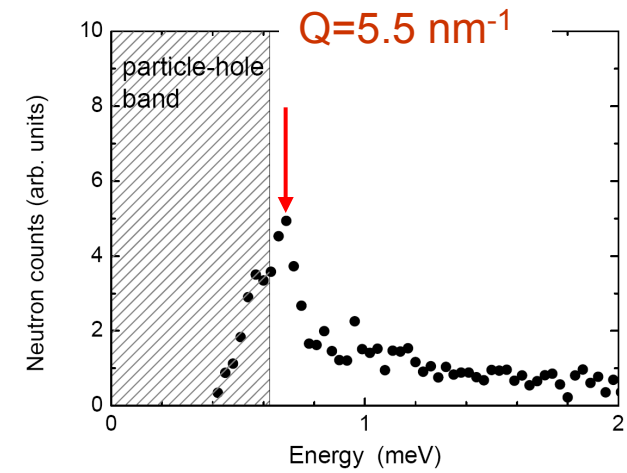
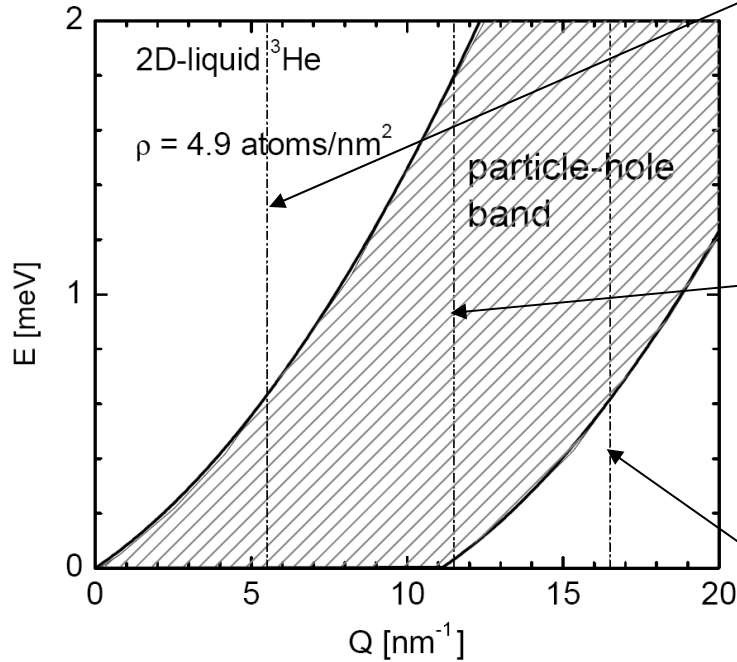


2D Liquid

^3He 2nd Layer
4.9 atoms/nm²
T=30mK
dQ=1nm⁻¹
dE=0.03 meV

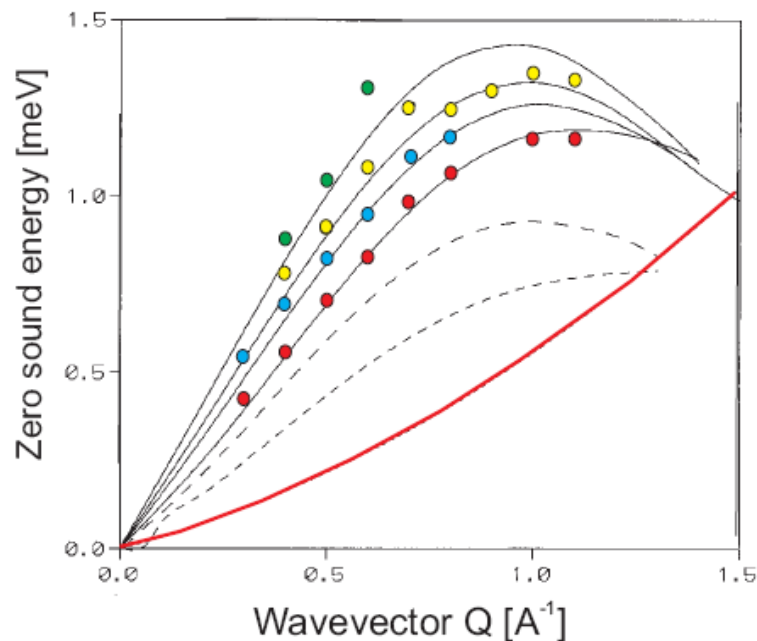
Glyde, Fak, Dijk, Godfrin, Guckelsberger and Scherm PRB 61(2000)1421] could clearly observe the zero sound mode well separated from the p-h band and the p-h band down to very low energy. In two dimensional Liquid, the collective mode differs substantially from the bulk case. It lies near by the p-h band and can be better found in constant Q plots. The experimental situation for 2D Liquid is more difficult because the graphite contributes intensively to the elastic scattering. Even a careful determination of the background could not lead to the observation of an inelastic signal below 0.4 meV.

$S(Q, \omega)$ pour quelques valeurs de Q

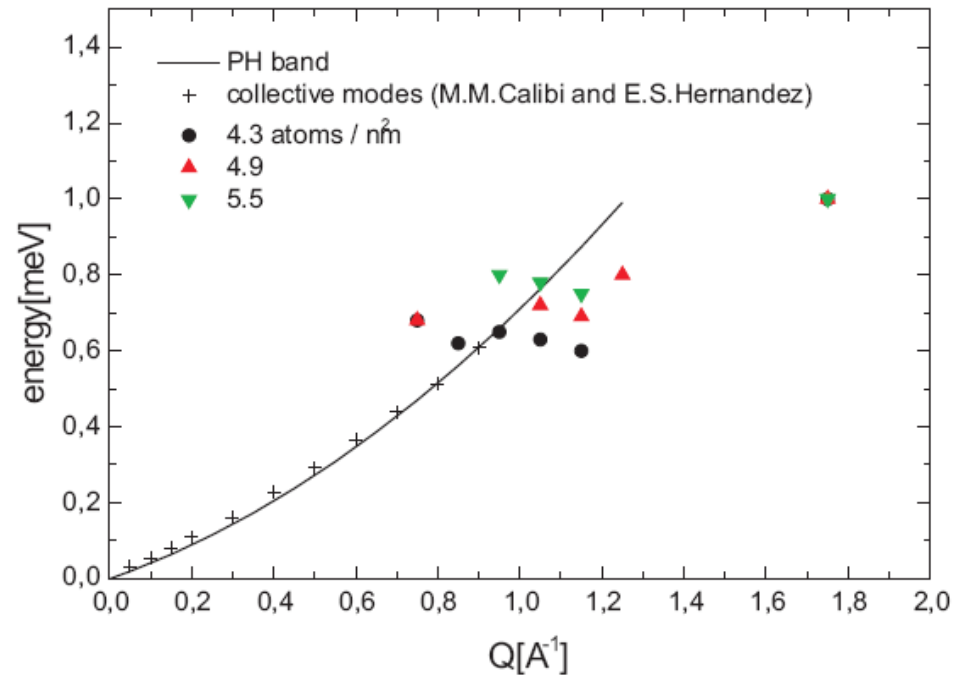


Comparison between bulk and 2D liquid ^3He

RPA model



Zero sound mode energy of bulk ^3He compared with RPA model [M. Barranco, E.S. Hernandez, J. Navarro PRB 54 (1996) 7349]
 The red line indicates the edge of the p-h band.
 Measured points correspond to pressures of SVP, 0.5, 1, 2 MPa at $T=120\text{mK}$.
 [R. Scherm, K. Guckelsberger, B. Fak, K. Sköld, A.J. Dianoux, H. Godfrin, W.G. Stirling, PRL 59(1987)217].



Theoretical prediction for the zero sound mode [M.M. Calibi, E.S. Hernandez, J. Low Temp Phys. 120(2000)1] of 2D Liquid with a density of 4 atoms/nm² compared to the results of the presented series of experiments. No excitations could be observed for energies below 0.5 meV due to the elastic background arising from the graphite substrate.

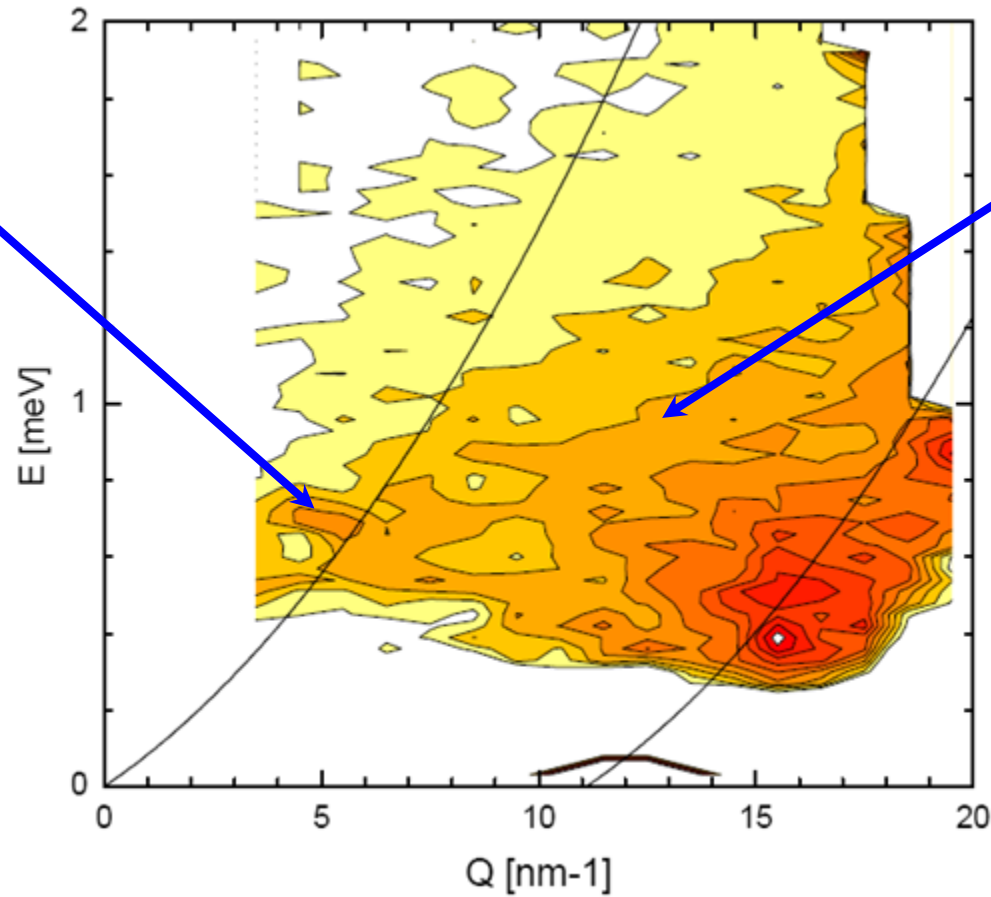
Premières conclusions

- A 2D, le mode de zéro-son est, à faible Q , au bord de la bande particule-trou.
- At Q plus élevé, il rentre dans la bande.
- L'amortissement de Landau (damping) élargit ce mode.

Expérience: comportement à fort Q

Zéro-son

Densité:
4.9 at/nm²



bande
particle-trou
 $m^*=m_3$



Première observation de Zero-sound (mode cohérent) au-delà du continuum!

- La relation de dispersion de ce mode de ^3He est similaire à celle du phonon-maxon-roton de ^4He liquide.
- Les interactions (et pas la statistique quantique !) sont à l'origine de ces modes.
- Leur atténuation (Landau damping) reste faible à des Q élevés : favorisé à 2D
- La théorie au-delà de la RPA est nécessaire
- Conséquences pour les plasmons : la cohérence et la supraconductivité des systèmes électroniques

Théorie au-delà de la RPA: excitation de paires

E. Krotscheck, M. Panholzer, H. Böhm

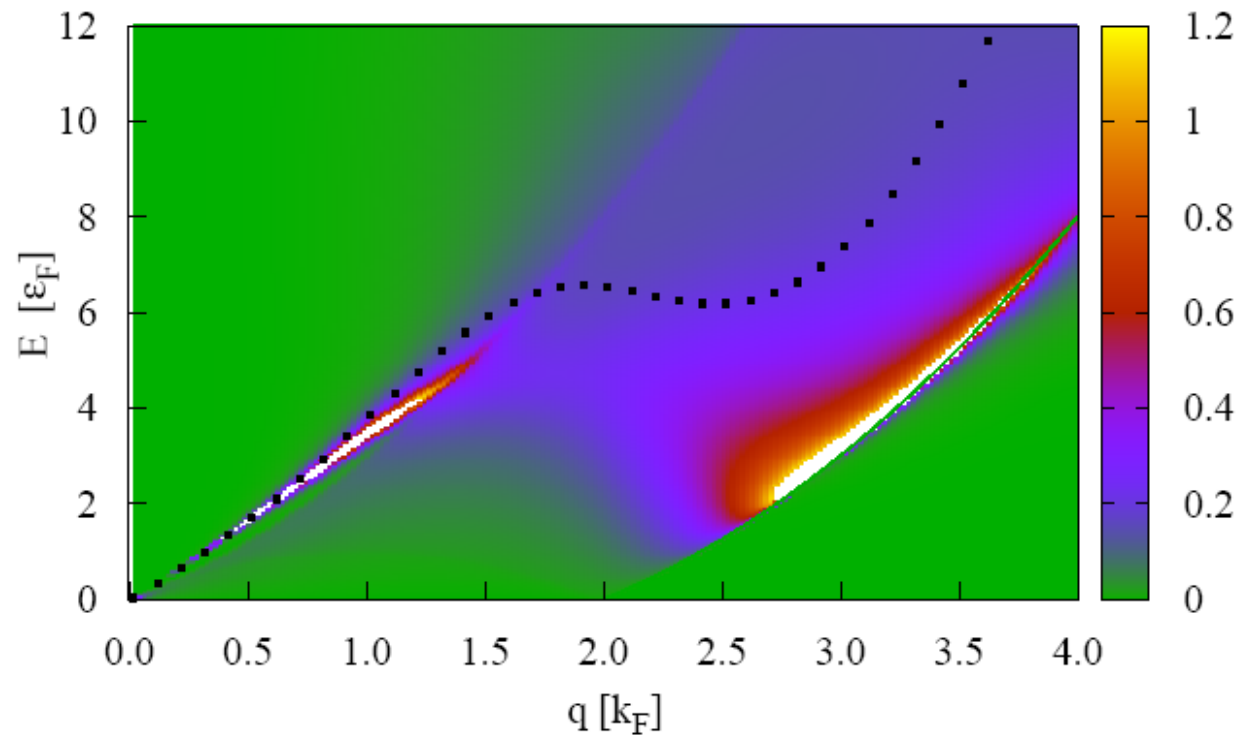
Johannes Kepler University, Linz, Austria

Densité:

$$0.32\sigma^{-2} = 4.9 \text{ at/nm}^2$$

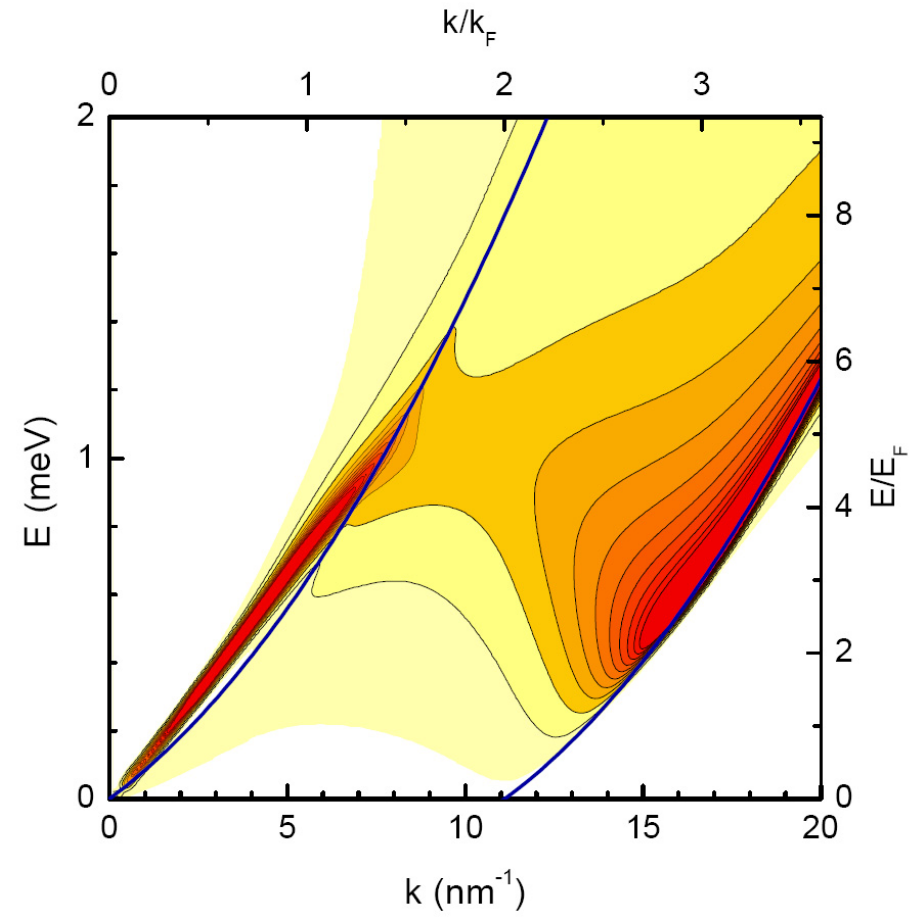
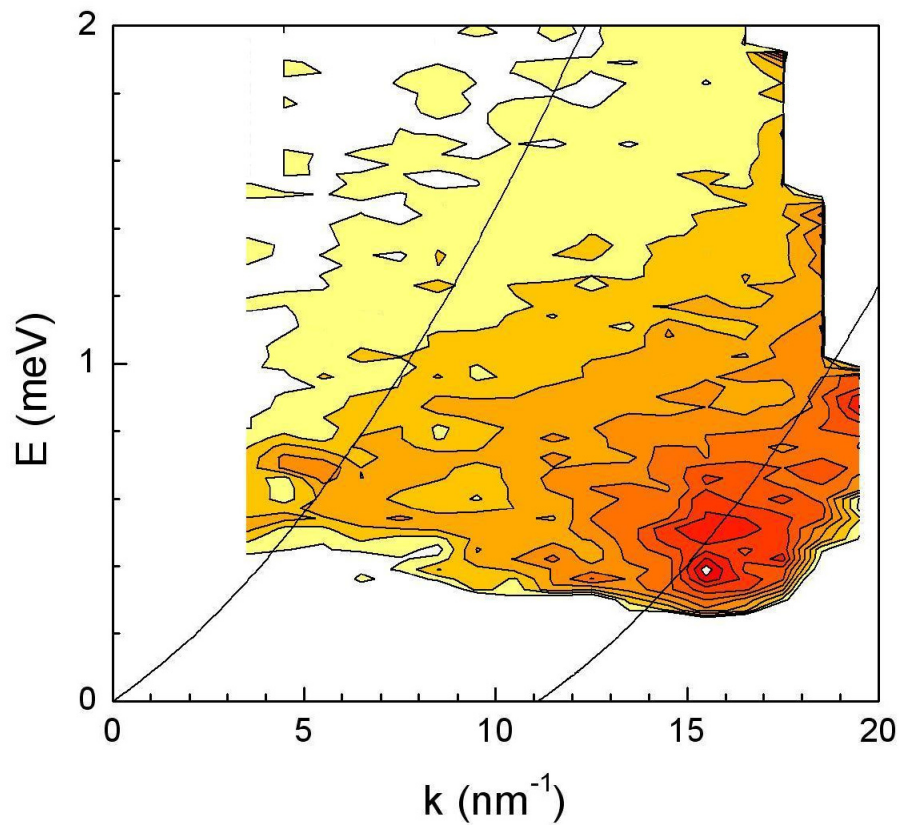
$$E_F = 0.213 \text{ meV}$$

$$k_F = 5.55 \text{ nm}^{-1}$$



Zero-Son : ^3He liquide 2D

Expérience et théorie



Une nouvelle interprétation des systèmes fortement corrélés

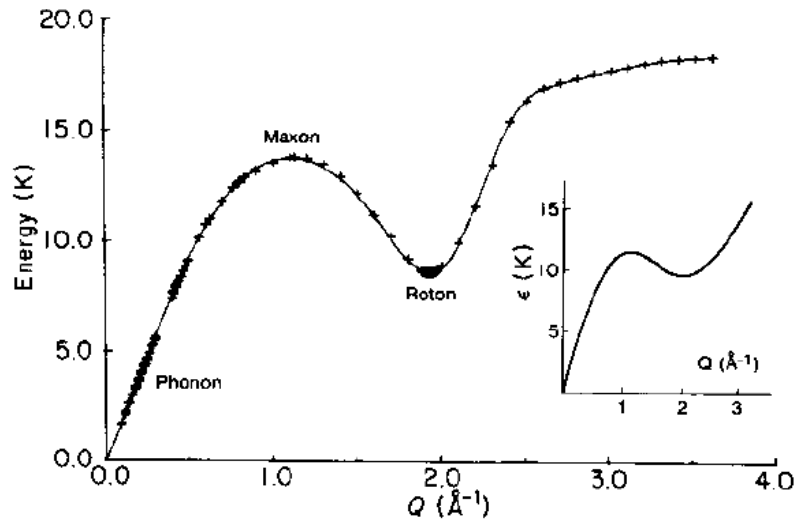
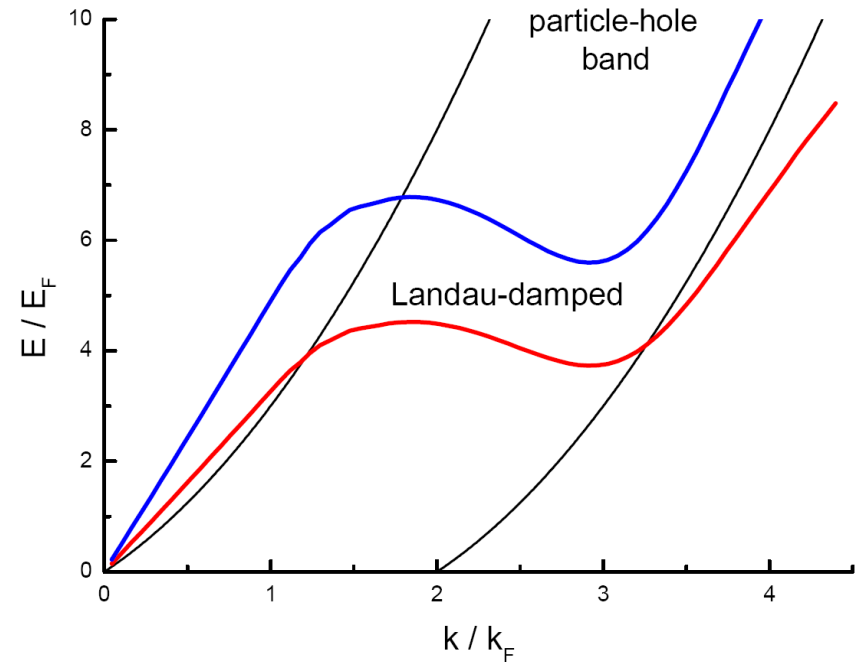


FIG. 7.1. The phonon-rotor energy compiled from several neutron scattering measurements by Donnelly *et al.* (1981). The inset shows the dispersion curve proposed by Landau (1947).

Bosons



Fermions

Conclusions

- L' ^3He liquide 2D : un vrai "système-modèle"
- Observation de Zéro-Son à 2D
- Première observation de modes collectifs au-delà du continuum dans les fermions fortement corrélés.
- Devrait être observable dans les systèmes électroniques 2D (spéculation sur plasmons).
- Le mode collectif est principalement dû aux interactions, pas à la statistique ($^3\text{He} \sim ^4\text{He}$).
- La théorie peut maintenant décrire le comportement des excitations à fort Q ("pair excitations")
- L'existence d'un mode collectif à Q élevé introduit de la cohérence dans la dynamique des fermions corrélés. Un nouveau mécanisme pour la supraconductivité à Haute T_c ?

Merci!



Conférence: QFS 2010 à Grenoble...