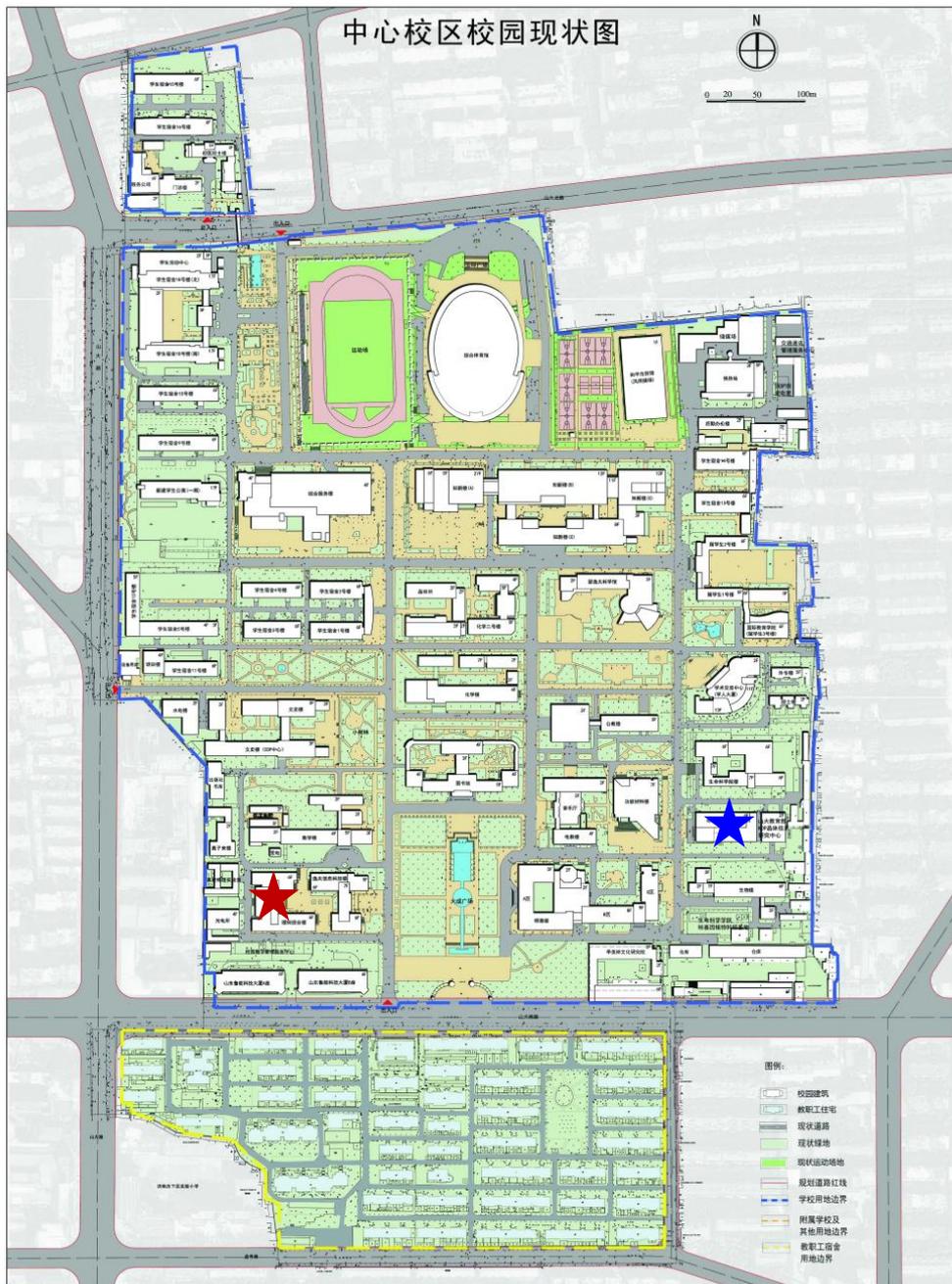
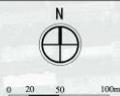


中心校区校园现状图



刘晓辉：

liuxiaohui@sdu.edu.cn

★ 上课地点

★ 办公地点

课件下载：

https://faculty.sdu.edu.cn/lxh/zh_CN/index.htm

教学资源（量子科技）

第一讲-量子理论.pdf

课程安排

第一周：量子理论

第二周：粒子

第三周：量子材料 (第一代)

第四周：量子材料 (第二代)

第五周：量子材料 (第三代)

第六周：陶瓷材料

第七周：碳材料

第八周：塑料材料

量子理论

——浅谈

刘晓辉，秦伟，解士杰

山东大学物理学院

晶体材料国家重点实验室

山东大学本科生院，山东大学文学生活馆

山东大学齐鲁青年学者启动经费

国家自然科学基金

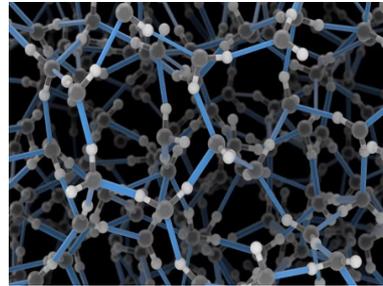
从经典到量子 — 认知的发展

➤ 客观实在 — 从感知到认知

- 热质说：曾经认为热量是一种客观实在；热是分子震动
- 电流：实际是带电粒子的流动
- 以太：曾经认为以太存在，实际也不存在
- 各种各样的微观粒子...



感知水-无形



认知水-H₂O

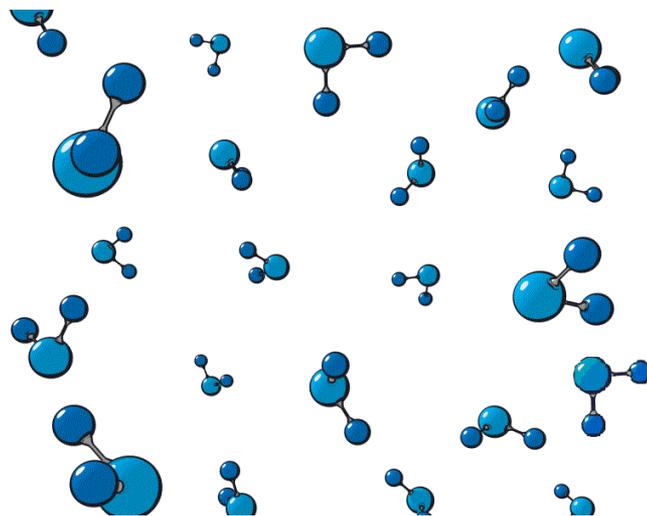
➤ 客观实在的相互作用

- 世界在不停地变化
- 总结运动规律
- 运用再发展：古典，经典，量子...

从经典到量子

- “连续”与“不连续（量子化）”
- “力—相互作用”

连续和不连续



- 杯子里的水是绝对连续被加入的吗？

连续/不连续 VS 宏观物体/微观物体

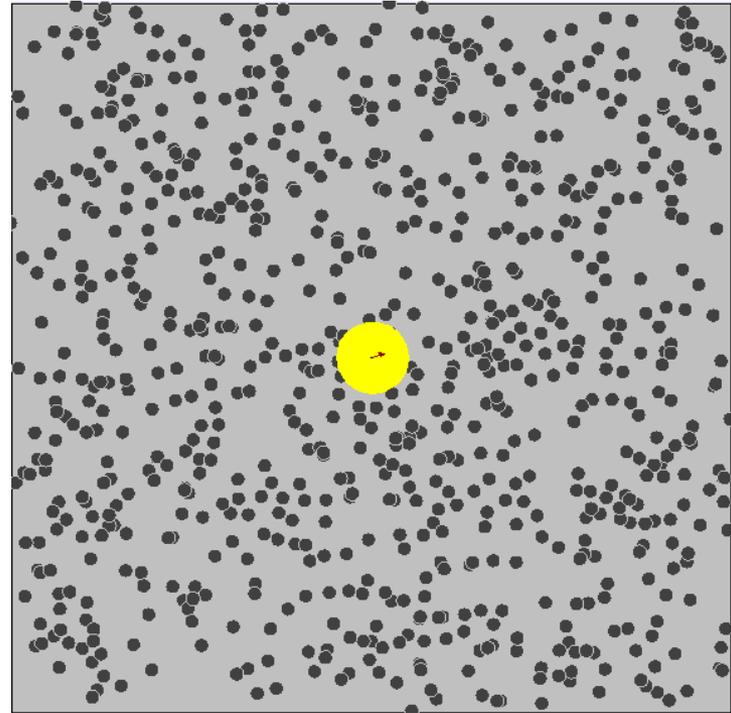


- “连续”是建立在一定尺度上的近似
- “不连续（量子化）”更实在！

布朗运动



茶叶



花粉

- 不同尺度的物体在同一作用下，运动是不同的。
- 在更小的原子尺度呢？

力—物体之间的相互作用—能量的传递



- 引力，电磁力，强相互作用，弱相互作用
- 能量的传递是一份一份的
- 力是抽象的概念，而能量是实实在在的。

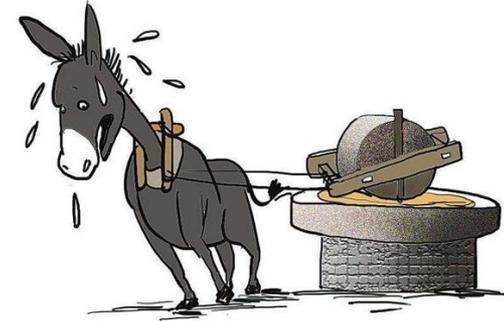
相互作用

力学理论的发展...

古典认知

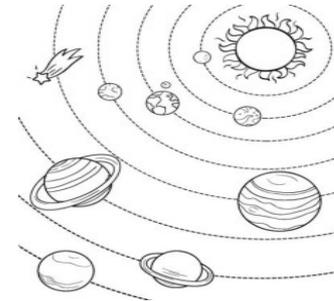
经验判断：“力，形之所以奋也”

— 《墨经》



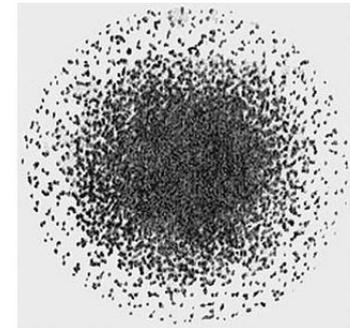
经典理论

- 机械论：牛顿三大定律，轨道，连续
- 对“力”的认知：作用，改变运动，



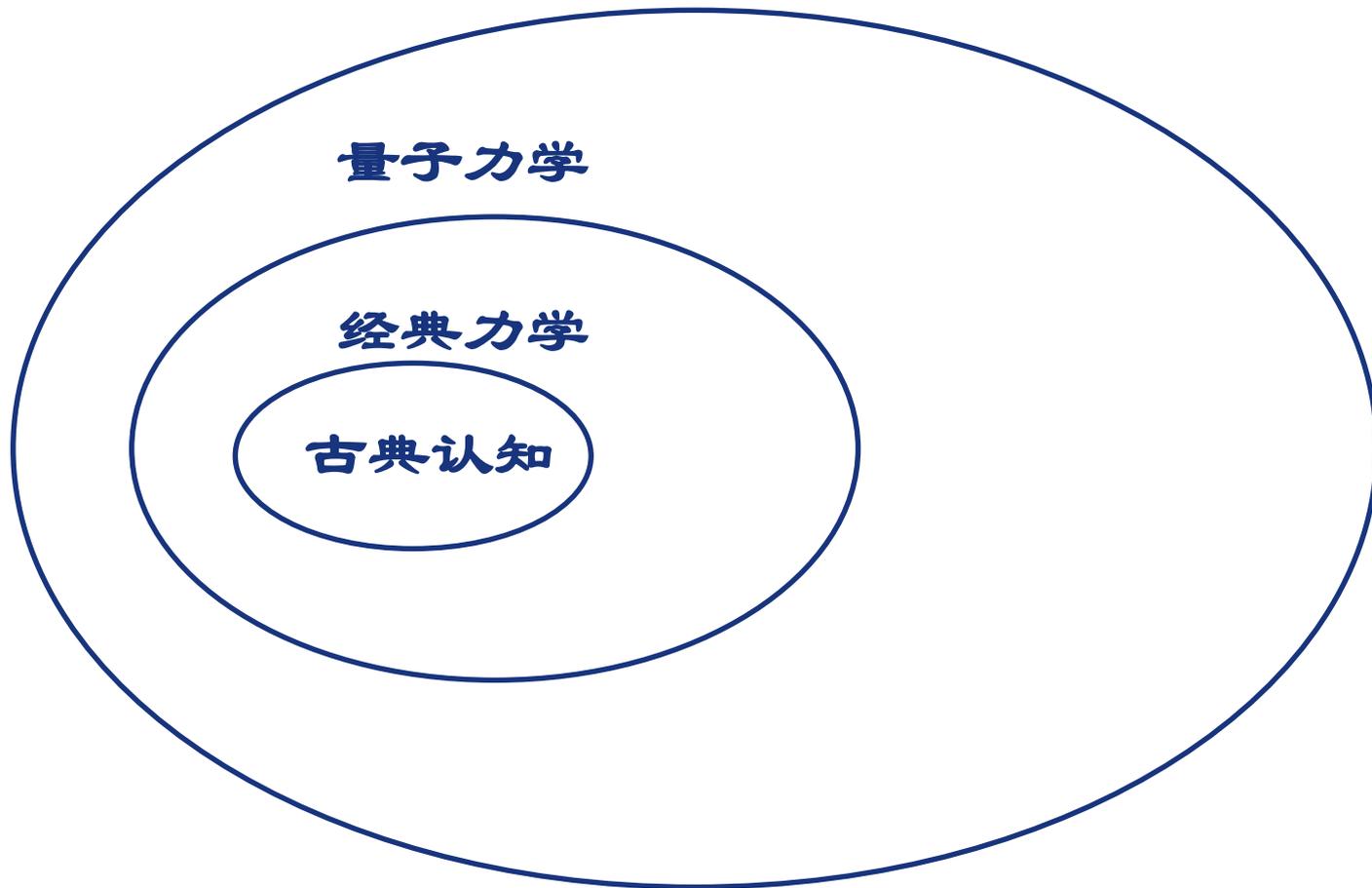
量子理论

- 不确定论：薛定谔方程，不连续的态，几率，量子。
- 物体运动描述：哈密顿量，跃迁



氢原子电子云

认知范围的扩大...



- 知识框架的边缘发现矛盾，矛盾的解决导致新的认知。

量子力学的发展

- 对确定性的认知：轨道，因果，观测...
- 对物质的认知：宏观和微观世界之间的联系（还原论）
- 人的好奇心

对光的认知：粒子说

◆ 牛顿时期

话语权：粒子说

光沿直线传播，反射

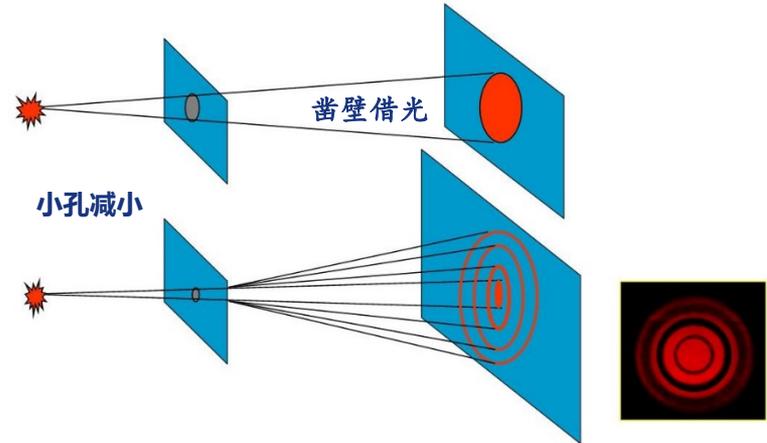


◆ 同时期惠更斯

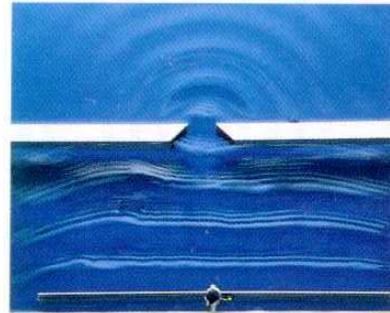
杂音：波动说

光的衍射

粒子说的反驳：
小孔壁的影响？



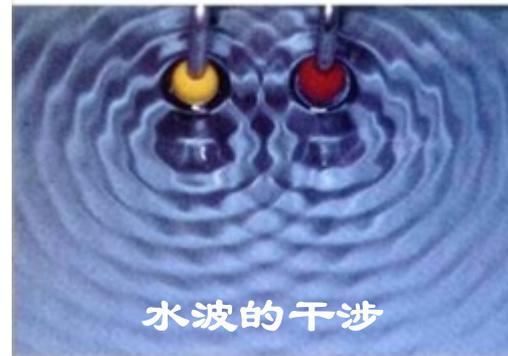
◆ 水波的衍射



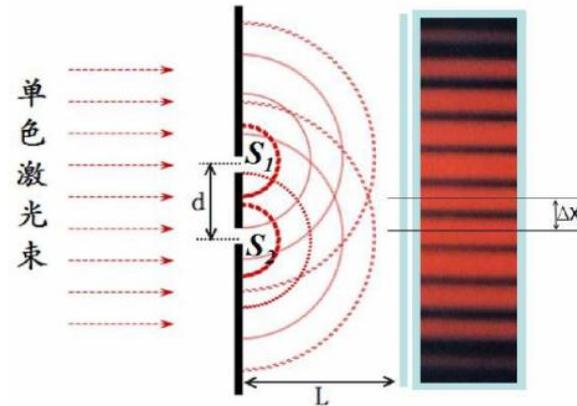
对光的认知：波动说

◆ 麦克斯韦时期

波动说抢过话语权：光是波！

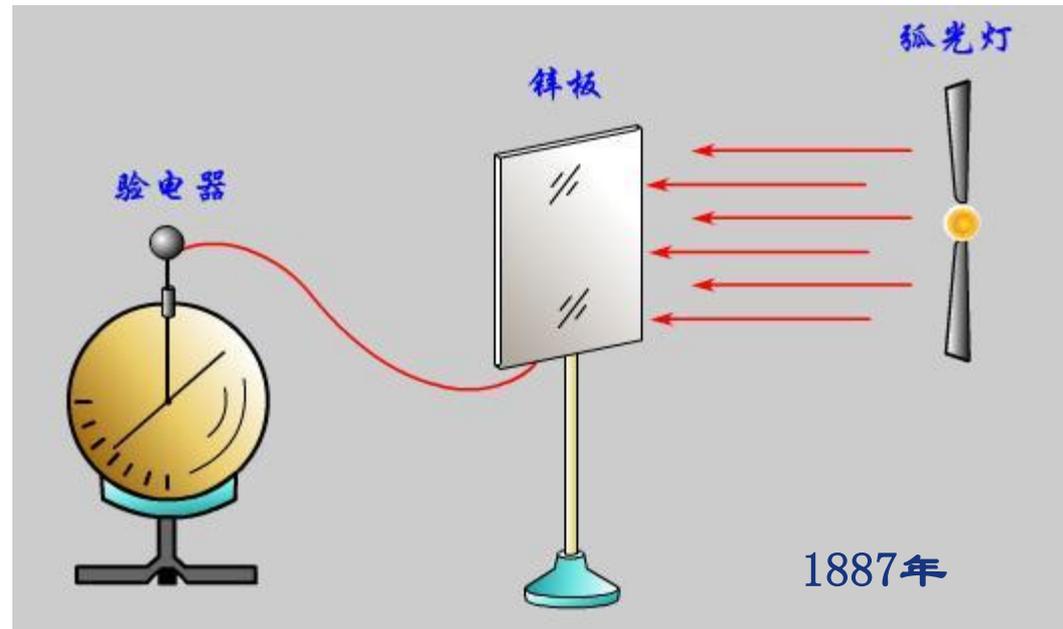


◆ 光波的双缝干涉



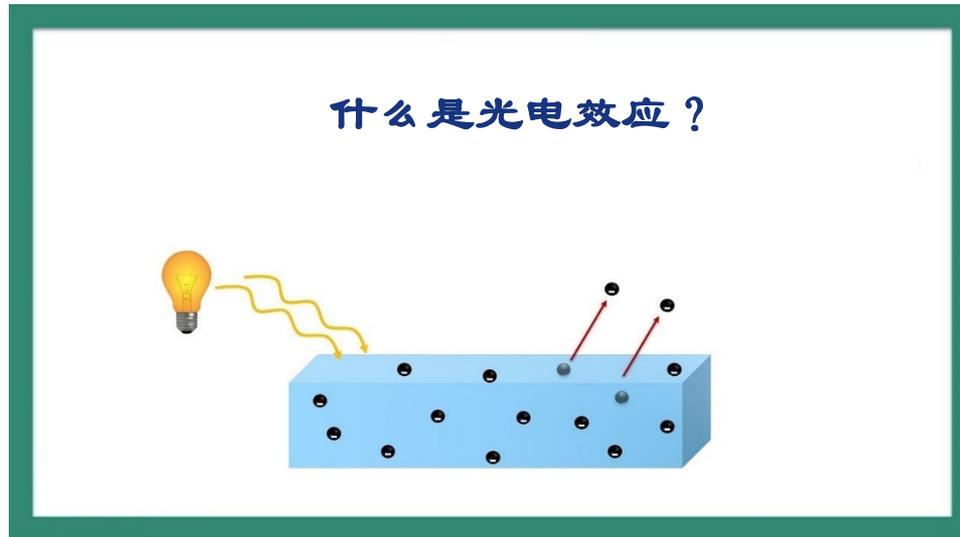
- 日常生活中光的干涉：水面的油膜
- 麦克斯韦的一套理论当时是无法实验证实的！
- 悬赏：证实或者证伪麦克斯韦的电磁波理论，导致了光电效应。

赫兹证实电磁波却发现光电效应



- 波动说无法解释光电效应
- 只知电流，不知电子。

粒子说回归！



- ◆ 1887年发现光电效应
- ◆ 1897年发现电子
- ◆ 1900年普朗克提出量子概念
- ◆ 1905年爱因斯坦解释光电效应

波粒二相性：粒子 + 波



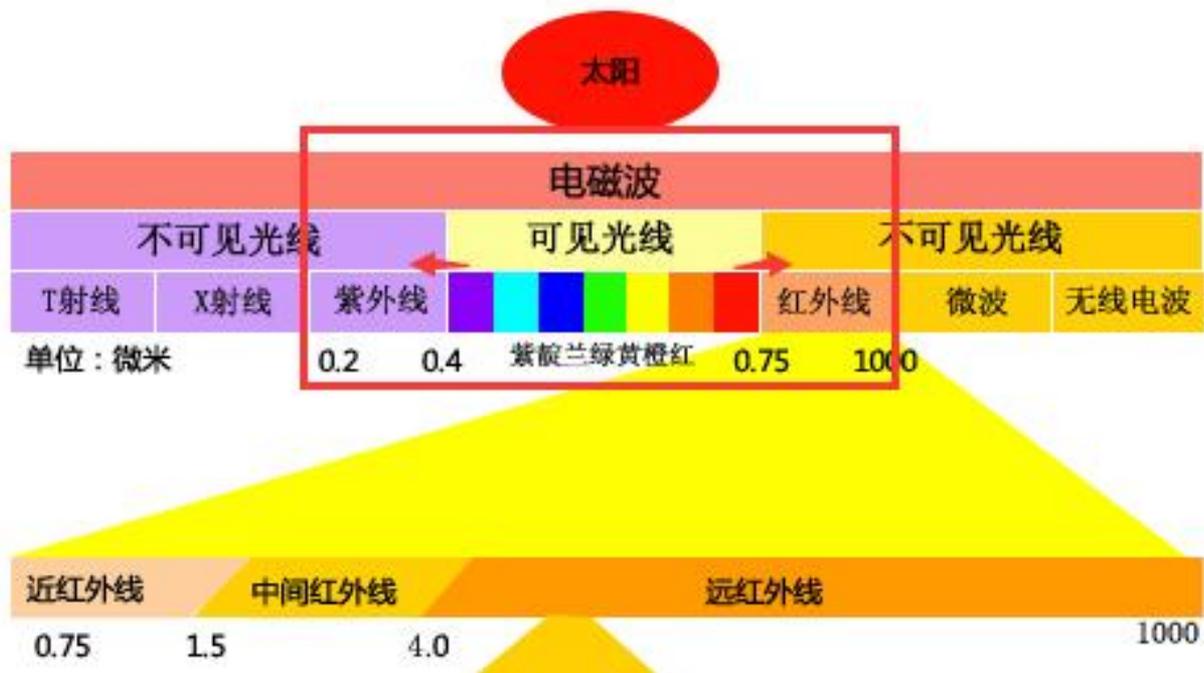
矛盾的对立统一

波：光粒子出现的位置，几率幅

粒子：物理量载体角度理解，如，能量，自旋，角动量...

能够同时完全看到手的反正面
不能同时完全确定粒子和波

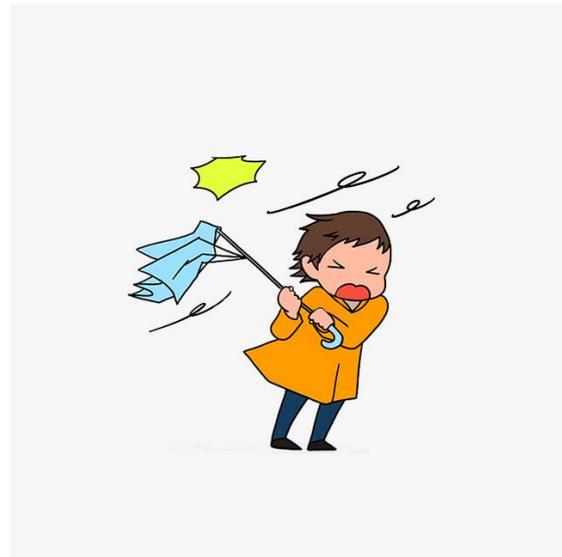
光波就是电磁波



**不连续的能量：一份一份的能量，
每一份 $h\nu$ ，一份一个光子**

- 无线电波可以衍射，不容易被阻挡；
- 波长越短，频率越高，能量越高：紫外线晒伤。
- 10W的日光灯，每秒释放 10^{20} （100亿亿）个光子

为什么感受不到光子呢：单个能量太小，就像感受不到风是一个一个空气分子。

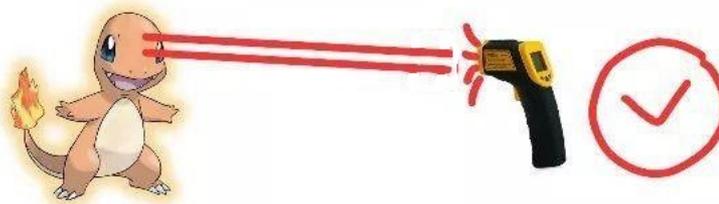
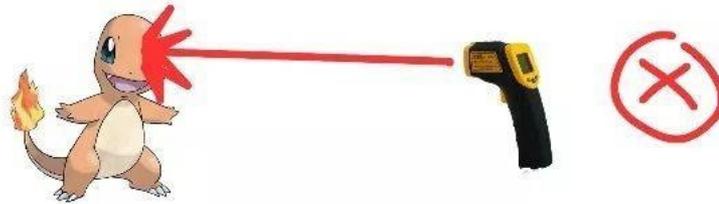


- **光在日常中表现出波动性。如果我们的眼睛灵敏到可以感受到单个光子，那么，光所展现在我们面前的将是一串光的闪烁。目前，人们用光子探测器确实“看到”了光子。**

光和温度的关系

黑体辐射

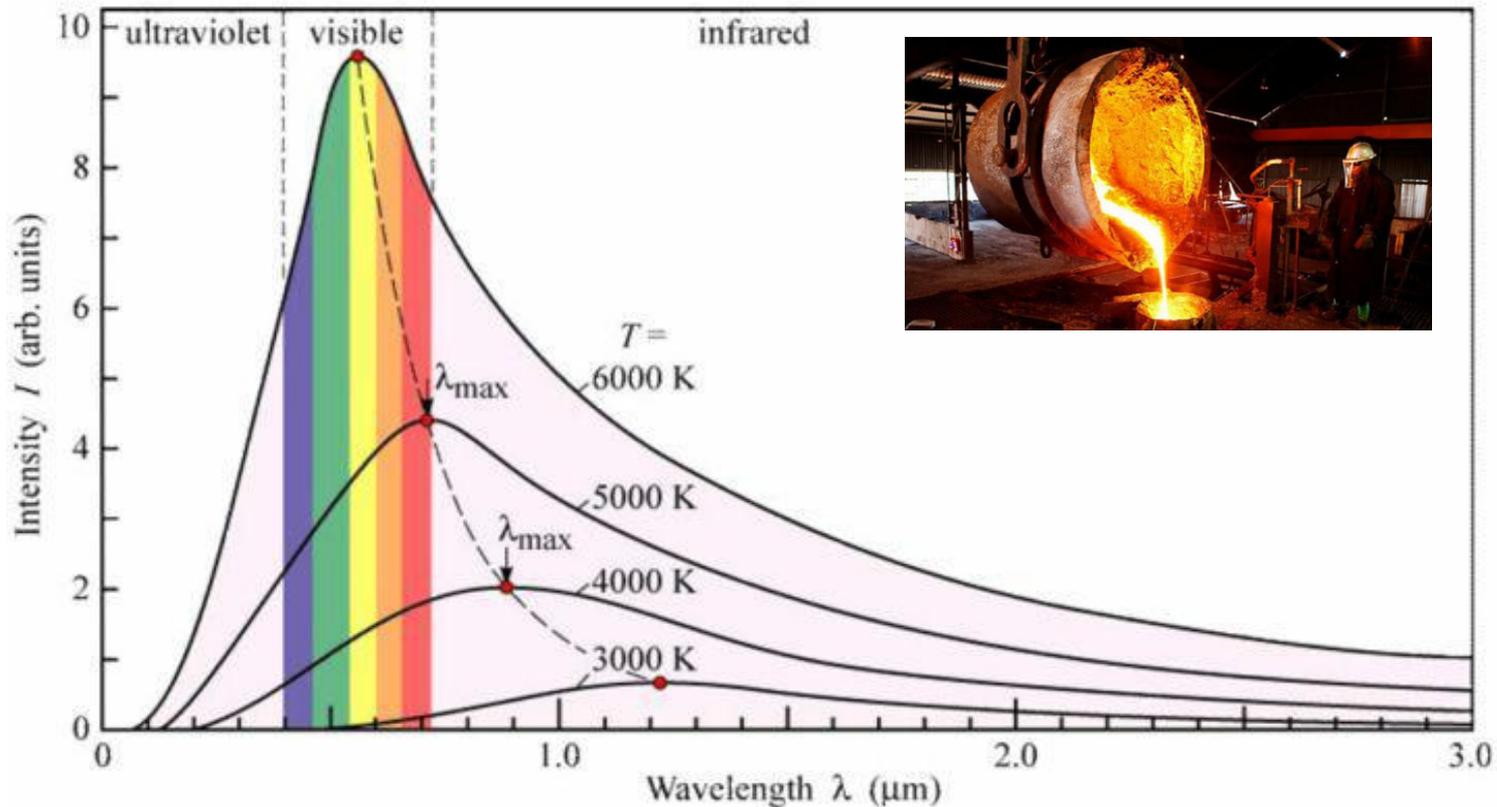
黑体不黑：只发光，不反射光！



- 物体辐射出来的光和温度有关：测温

研究黑体的时代背景

100年前大炼钢铁中的一个关键技术问题：
如何测量铁水的温度？



- 人们发现了温度和波长对应关系。
- 只有把光的能量视为不连续，才能解释。

从光波到物质波

德布罗意的博士学位论文

**所有粒子
都具有波粒二象性！**

传奇的德布罗意：

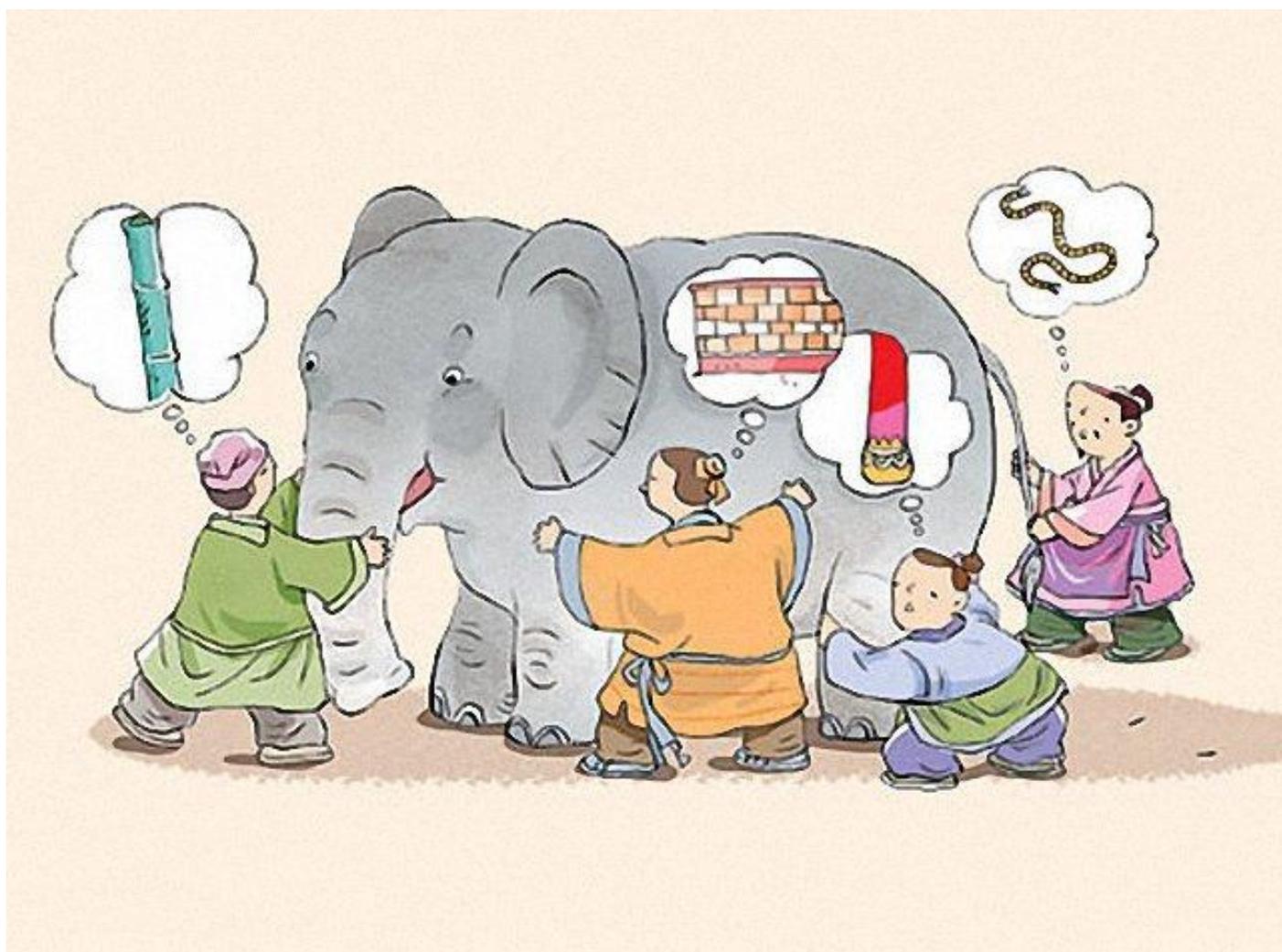
- ◆ 简朴的贵族
- ◆ 历史系毕业生
- ◆ 转行物理
- ◆ 超前的思想
- ◆ 博士论文得诺奖



波尔的互补原理和族徽



- “微粒和波的概念是互补的，同时又是互相矛盾的，它们是运动过程中的互补图像”
- 对立与统一

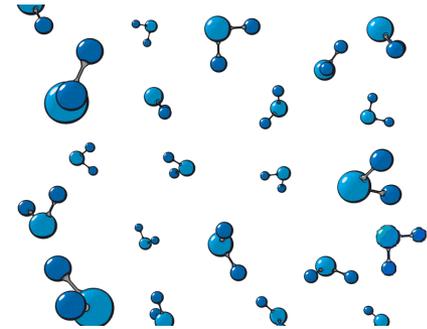


上节回顾

连续

VS

不连续 (量子化)



波粒二相性：粒子 + 波

波：光粒子出现的位置，几率幅

**粒子：物理量载体角度理解，如，能量，自旋，角动量…
(粒子不是空间概念)**

物体运动规律

经典力学方程：

$$F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

机械的，确定轨道



量子力学方程：

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = H\psi(\vec{r}, t)$$

随机的，概率波



物质波是什么？

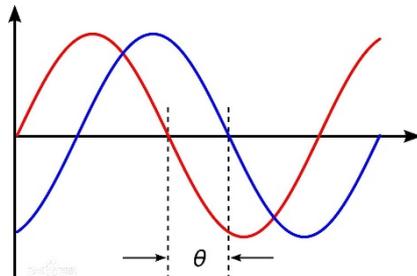
粒子在空间某点出现的几率 P 为正数，但量子理论不是给出 P 的运动方程，而是给出它的开根号函数，

$$P(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$

这个函数可以是正，也可以是负，甚至也可以是复数！反正取绝对值后都是正的（包括零）！

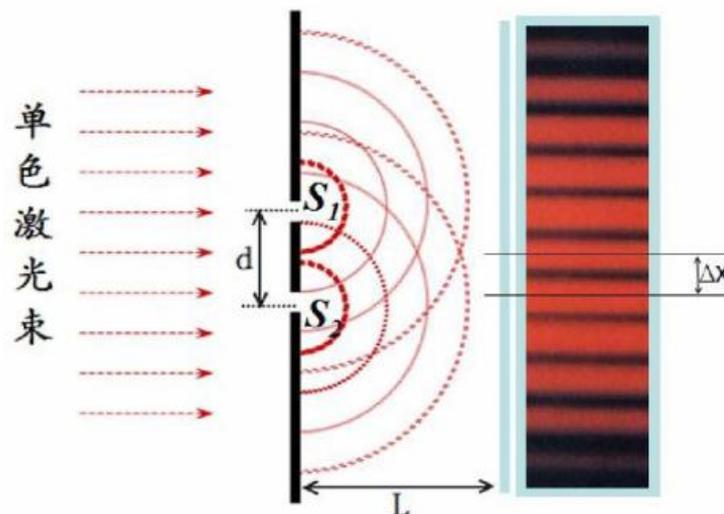
杨振宁：量子化、对称性和相位因子是二十世纪物理学的主旋律

$$z = x + iy = \rho e^{i\theta}$$



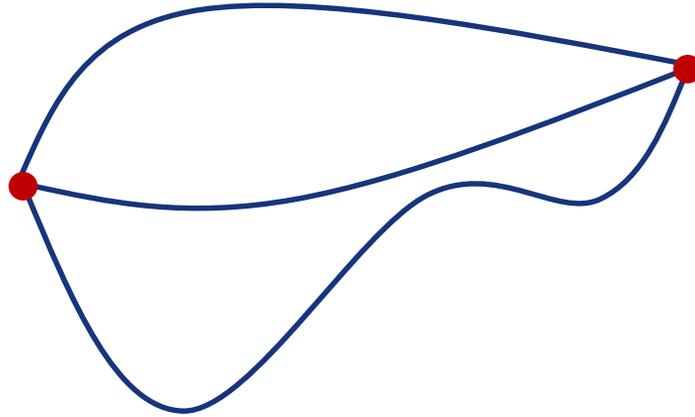
几率与波函数的双簧

- 几率与波函数如同台前与幕后，真正操作几率的是波函数。
- 一束光照在墙上，亮度是1，同样的另一束光也照在这里，总亮度似乎为2。但量子上不是这样，总亮度是背后操纵光强的波函数叠加后，再取模，结果也可能为零！
- 捣鬼的就是位相！



路径改变了相位

路径选择



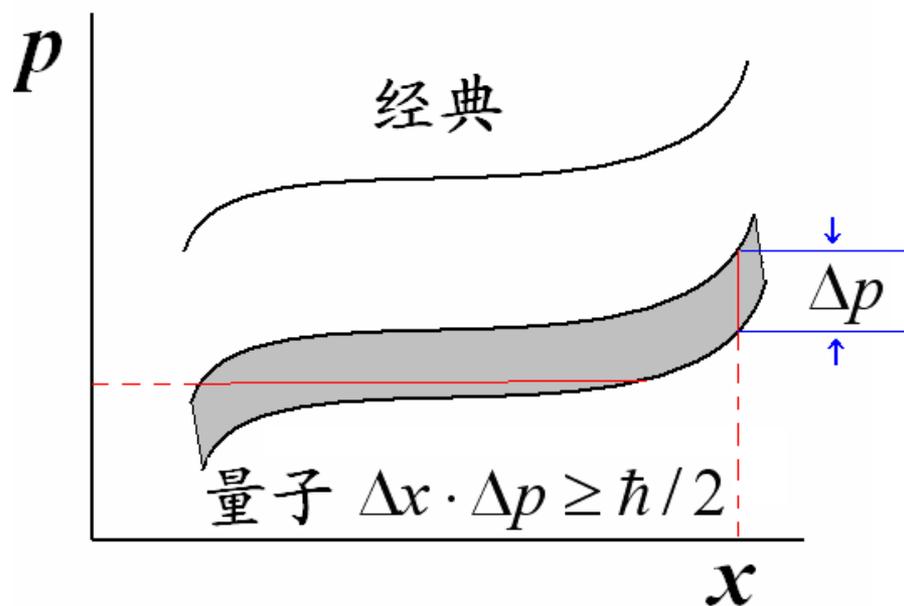
经典：粒子运动路径选择，最短。

量子：每条路径都可能，概率。

粒子在 x - p 空间的轨迹

——测不准原理

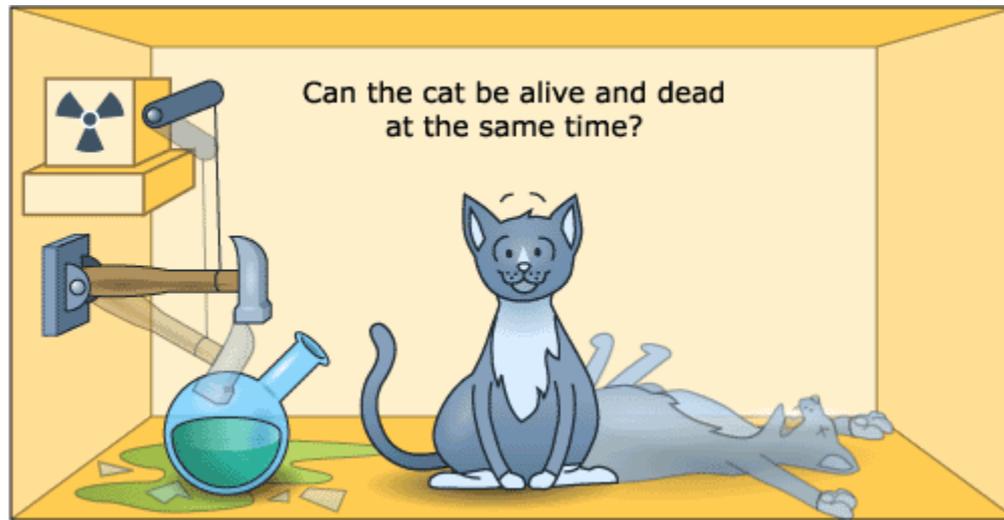
(x, p) 组成相空间，表示粒子的一个状态



- 位置与动量互补，共同描述粒子状态。
- 无法确切知道现在！

薛定谔的猫

生？死？



- 测量（观测）导致坍塌！
- 微观世界和宏观世界的联系。

物理学的四大神兽

麦克斯韦妖：热力学第二定律。

薛定谔的猫：不确定性。

芝诺的乌龟：微积分的思想

拉普拉斯兽：机械论，因果。

“四大神兽”的思想实验人类对知识的反思消化的结果。

Two-, Three-, and Four-Atom Exchange Effects in bcc ^3He

J. H. Hetherington and F. D. C. Willard

Physics Department, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824

(Received 22 September 1975)

We have made mean-field calculations with a Hamiltonian obtained from two-, three-, and four-atom exchange in bcc solid ^3He . We are able to fit the high-temperature experiments as well as the phase diagram of Kummer *et al.* at low temperatures. We find two kinds of antiferromagnetic phases as suggested by Kummer's experiments.

We have been able both to fit the high-temperature solid- ^3He magnetic data¹⁻⁶ and, through mean-field theory, to obtain a phase diagram like that of Kummer *et al.*^{7,8} We consider only three mechanisms of exchange,⁹⁻¹¹ two-atom, three-atom rings, and four-atom rings, and adjust their strengths to fit the data.

The Hamiltonian we take is of the form¹²

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{4} \sum_i \sum_{\nu} J_{\nu} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_{i+\nu} - \mu \vec{B} \cdot \sum_i \vec{\sigma}_i - \frac{1}{4} \sum_{i,j,k} \Lambda_{ijkl} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j (\vec{\sigma}_k \cdot \vec{\sigma}_l), \quad (1)$$

where the sum over ν indicates a sum over the neighbors of site i . The σ 's are Pauli spin matrices. Ordinary two-atom exchange contributes negatively to J_1 . Three-atom-ring exchange contributes positively to J_1 and J_2 . Four-atom-ring exchanges are of two kinds because there are two

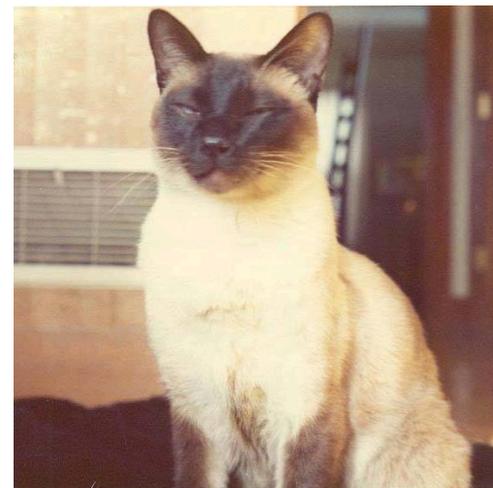
terms \mathcal{H} with an overall positive sign.

Without the σ^4 terms in \mathcal{H} only these two structures are possible in mean-field theory when only J_1 and J_2 are nonzero. Without proof, we have assumed that consideration of these two phases is adequate even when the σ^4 terms are present.

The computation proceeded by examining at each value of T and B all solutions of the mean-field equations for the scf, naf, and paramagnetic phases and choosing the solution with lowest free energy.

The high-temperature experiments can be summarized by noting that the partition function Z can be expressed in general in the form¹³

$$N^{-1} \ln Z = \ln 2 + \frac{1}{8} e_2 \beta^2 + \dots + \frac{1}{2} y^2 (1 + \frac{1}{2} \alpha_1 \beta + \dots) + \dots, \quad (2)$$



Solid helium 3: a nuclear antiferromagnetic element

META Willard, F.D.C.

Citation Export ...

Abstract

[en] Results of experiences on nuclear magnetic structure of ordered solid helium 3 owing to quantum exchange at 0.5 mk are briefly exposed

[fr] On expose brievement les resultats d'experiences sur la structure magnetique nucleaire, due a l'echange quantique de l'helium 3 solide ordonne vers 0,5 mk

Original Title	L'helium 3 solide: un antiferromagnetique nucleaire
Primary Subject	ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS (A1200)
Record Type	Journal Article
Journal	Recherche (Paris); ISSN 0029-5671; v. 11(114); p. 972-973
Country of publication	France
Descriptors (DEI)	ANTIFERROMAGNETIC MATERIALS, CRYSTAL LATTICES, HELIUM 3, NUCLEAR STRUCTURE
Descriptors (DEC)	CRYSTAL STRUCTURE, EVEN-ODD NUCLEI, HELIUM ISOTOPES, ISOTOPES, LIGHT NUCLEI, MAGNETIC MATERIALS, NUCLEI, STABLE ISOTOPES
Publication Year	1980
Language	French
Reference Number	12574285
INIS Volume	12
INIS Issue	2

Other name(s)	Felis Domesticus, Chester.
Species	Cat
Breed	Siamese cat
Sex	Male
Born	1968
Died	1982
Known for	First cat to co-author a physics paper
Owner	Jack H. Hetherington

波尔的对应原理

宏观和微观的联系

在原子范畴内的现象与宏观范围内的现象可以各自遵循本范围内的规律，但当把微观范围内的规律延伸到经典范围时，则它所得到的数值结果应该与经典规律所得到的相一致。

- 在大量子数极限情况下，量子体系的行为将渐近地趋于经典力学体系。
- 在普朗克常数 h 趋于零的极限情况下，量子力学可以形式地过渡为经典力学。

“格物致知”

物：客观实在
知：规律，道，…



- 王阳明“格”竹 致 天人合一
- 牛顿“格”苹果 致 万有引力
- 伽利略“格”铁球，开普勒“格”天体运动… 致 经典力学
- 惠更斯，牛顿，爱因斯坦，麦克斯韦“格”光 致 量子
- …

更小：格“量子”致



更大：格“宇宙”致



终极理论离我们多远？

对自然定律的螺旋式认知…
对量子理论的认识还在继续



“高山仰止，景行行止。虽不能至，然心向往之。”

小结

- 量子体系：轨道不确定，几率波，分立的状态。
- 物质波：波粒二象性。
- 大量子数极限下，量子体系行为趋向于经典力学体系。