

量子粒子

——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

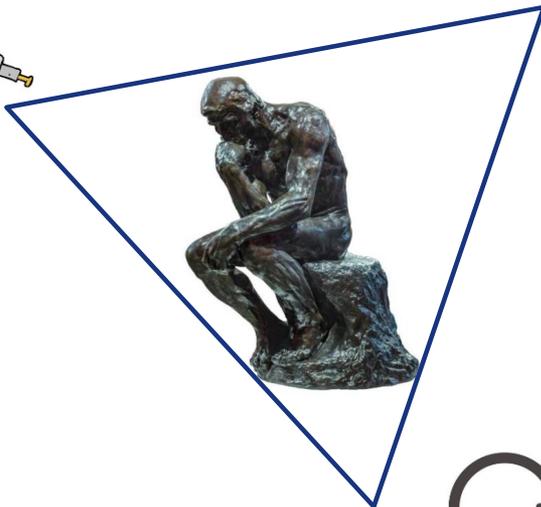
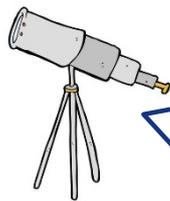
国家自然科学基金

世界是什么样子的？

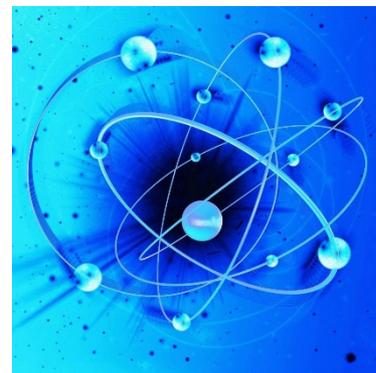
三个视角...



更大的世界



我们的世界



更小的世界

...

◆ 对我们世界的认知产生经验物理

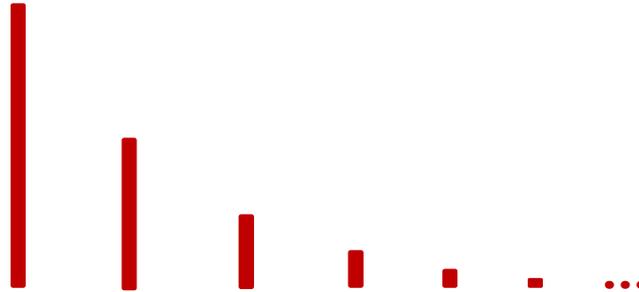
◆ 对天体运动的认知产生经典物理

◆ 对更小世界的认知产生量子物理

...

更小的世界

2000年前古典的物质可分思想...



“一尺之捶，日取其半，万世不竭”
——《庄子》

$1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$, ...

无论多么小，性质还一样吗？

中国的五行：金木水火土，端（墨子）

古希腊的四元素：土气水火；原子（德谟克利特）

哲学问题：世界是如何构成的？

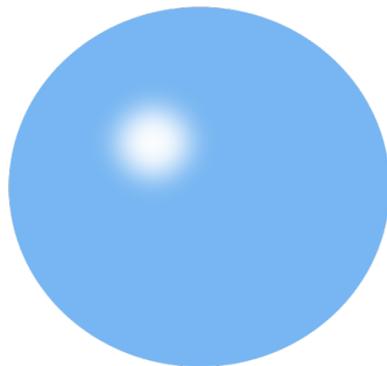
近代原子论复兴

200年前...

科学背景：牛顿经典力学的建立如何建立

时代背景：近代工业化开始

目标：建立物理学和化学的基本理论

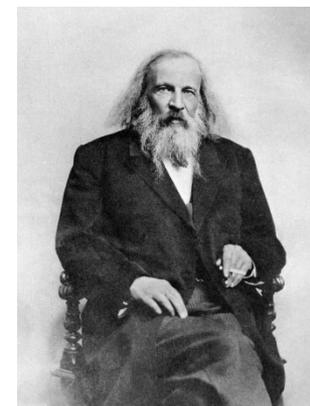


道尔顿

- ◆ 原子是实心的小球，不可分割
- ◆ 不同物质，不同原子组成

元素周期表

150年前...

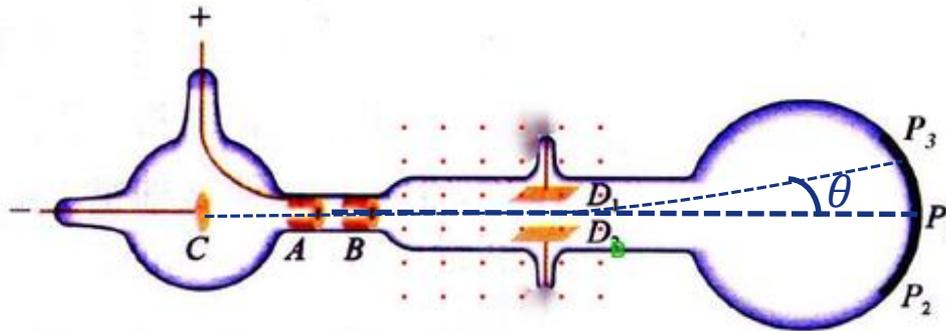


IA 1												0 18					
1 H 1.0080											2 He 4.002602						
IIA 2												IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	
3 Li 6.97	4 Be 9.012182											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0069	8 O 15.9994	9 F 18.9984032	10 Ne 20.1797
11 Na 22.98976928	12 Mg 24.3050											13 Al 26.9815386	14 Si 28.085	15 P 30.973762	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.948
		IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIB 7	VIII 8 9 10					IB 11	IIIB 12				
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955912	22 Ti 47.867	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.938045	26 Fe 55.845	27 Co 58.933195	28 Ni 58.6934	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.63	33 As 74.92160	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.90585	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc [97.9072]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90550	46 Pd 106.42	47 Ag 107.8682	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.90447	54 Xe 131.293
55 Cs 132.9054519	56 Ba 137.327	57-71 La-Lu *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94788	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.084	79 Au 196.966569	80 Hg 200.59	81 Tl 204.384	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98040	84 Po [208.9824]	85 At [209.9871]	86 Rn [222.0176]
87 Fr [223.0197]	88 Ra [226.0254]	89-103 Ac-Lr **	104 Rf [261.1088]	105 Db [262.1141]	106 Sg [266.1219]	107 Bh [264.12]	108 Hs [277]	109 Mt [268.1368]	110 Ds [281]	111 Rg [272]	112 Cn [285]	113 Uut [285]	114 Uuq [289]	115 Uup [288]	116 Uuh [289]	117 Uus [291]	118 Uuo [293]

◆ 自然存在：90多种元素原子

原子是有结构的

120年前...



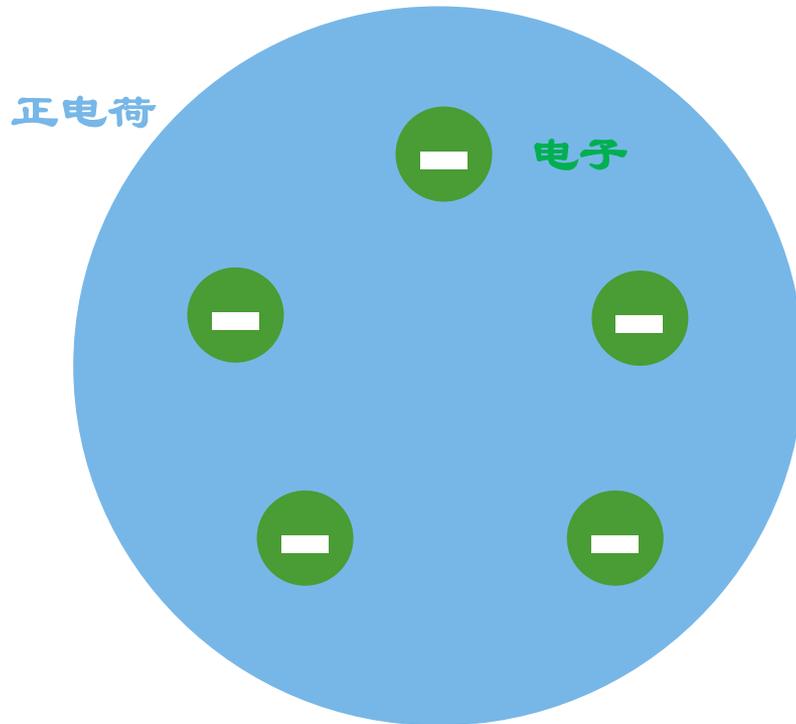
电子的发现

1858年阴极射线被发现。

1897年汤姆逊确定阴极射线电荷质量比，确定为粒子。

电子是怎么存在于原子中的呢？

枣糕模型



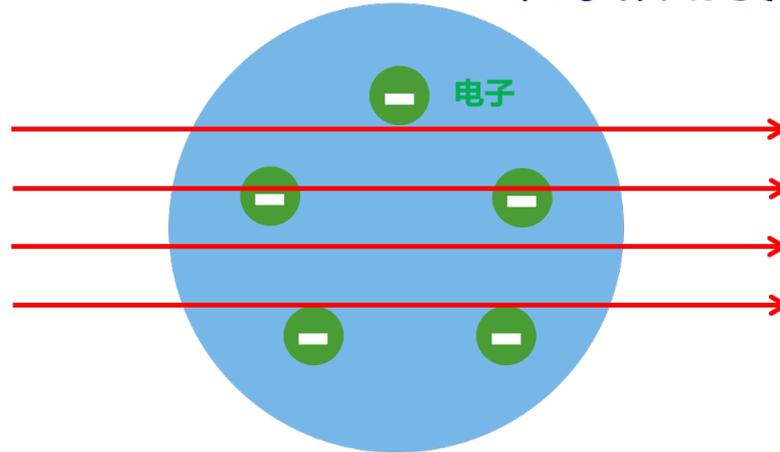
原子“糕”
电子“枣”

◆ 1898年汤姆逊提出枣糕模型假设。

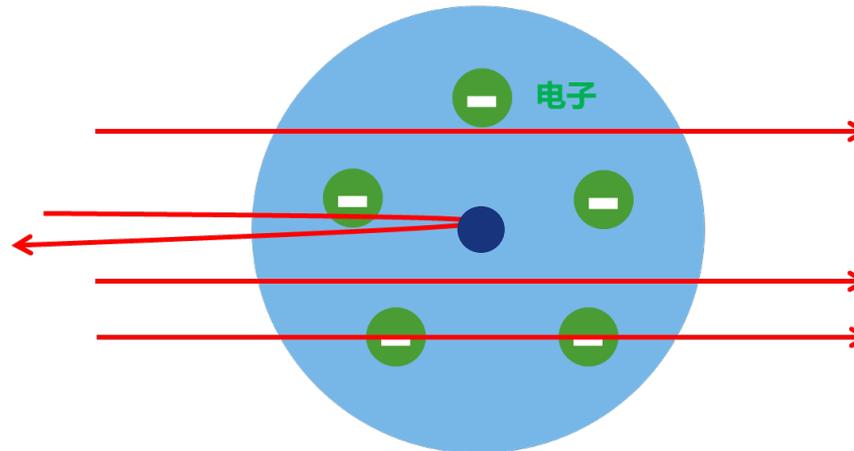
原子核的发现

粒子散射实验

“枣糕”



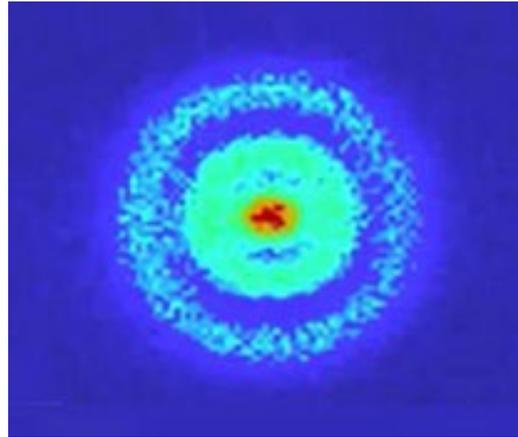
实际...



- ◆ 1909~1911年，汤姆逊的学生卢瑟福推翻“枣糕”模型
- ◆ 电子和原子核如何结合？

电子绕原子核运动

量子理论发展...



氢原子电子云

◆ 原子核也是可分的：中子，质子

打碎粒子



欧洲核子中心粒子对撞机

物体 → 分子 → 原子 → 原子核 → 质子 → 更基本的粒子...



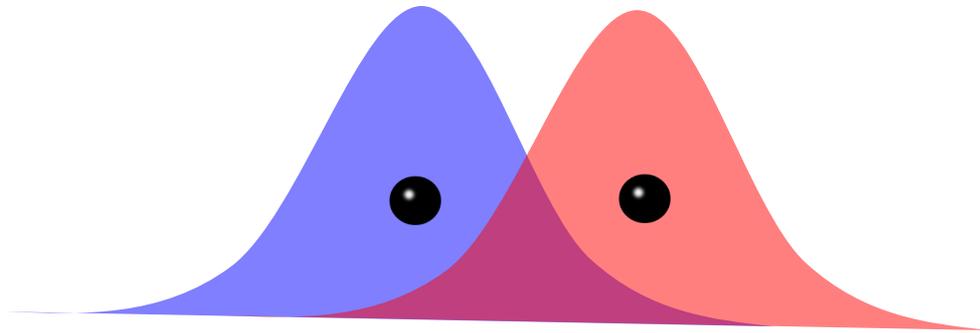
◆ 粒子越小，打开的能量越大...

量子粒子 VS 经典粒子

统计：多粒子系统下，粒子状态的分布。

经典粒子：可分辨，玻尔兹曼统计

量子粒子：不可分辨，全同性，量子统计（费米统计，玻色-爱因斯坦统计）



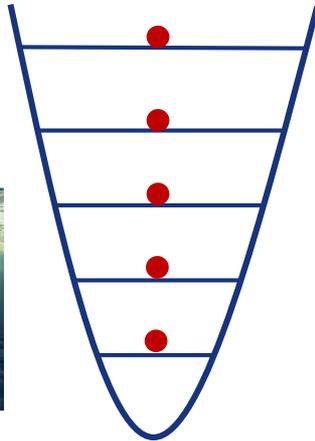
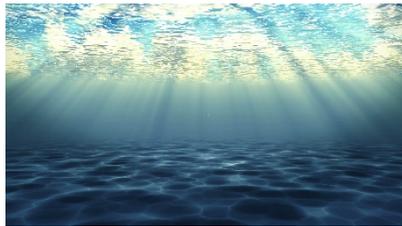
粒子空间分布不确定性

粒子世界的两个家族

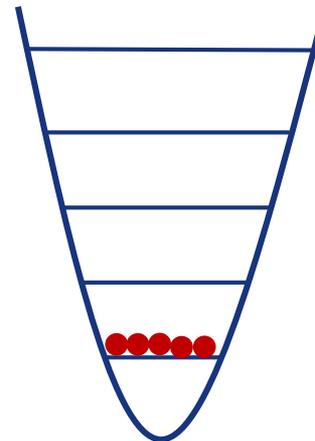
费米子和玻色子

电子，光子，质子，中子

声子，空穴，库珀对，马约拉纳费米子，外耳费米子...



费米子



玻色子



遵循不同的统计规律：

费米子：喜欢“独居”

玻色子：喜欢“群居”

两个粒子家族的代表： “电子”和“光子”

电子—费米子；光子—玻色子



光



电

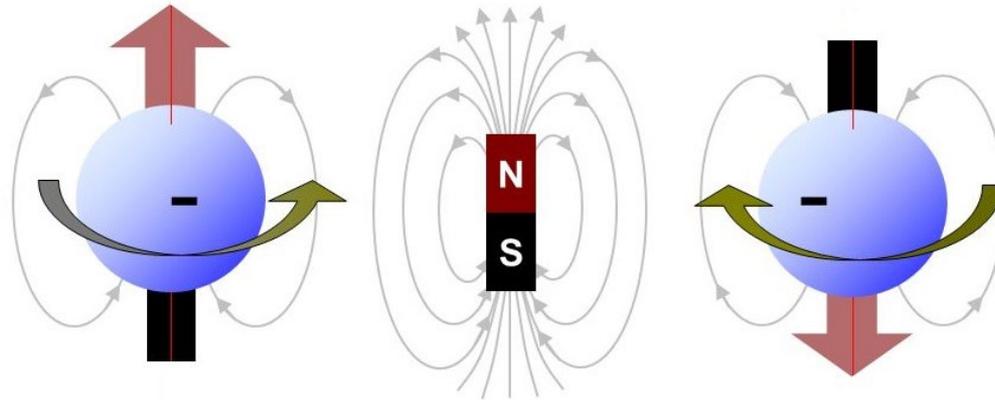


光电

- ◆ 光子穿越1.5亿千米来到地球
- ◆ 电子引发生活中的静电现象
- ◆ 电子产品的操作：对“光子”和“电子”驾驭

认识一下电子

电子具有自旋 $+1/2$ 或 $-1/2$



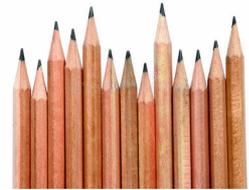
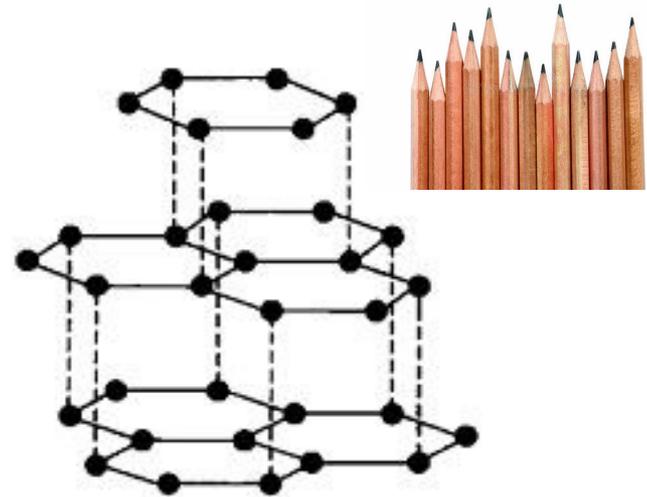
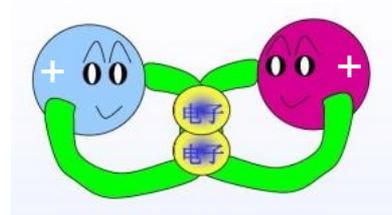
➤ 电子的自旋的发现

1925年G. E. 乌伦贝克和S. A. 古兹密特受到泡利不相容原理的启发，分析原子光谱的一些实验结果。

➤ 粒子的自旋并非经典的旋转概念，和质量、电荷一样，属于粒子的内秉属性。

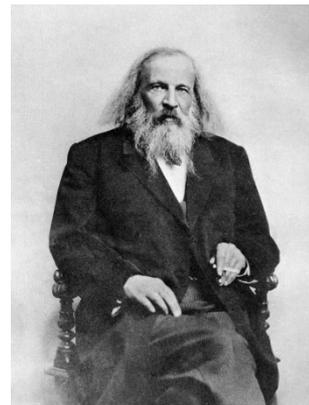
电子很轻，很重要

原子聚集在一起的纽带



- ◆ 质量轻：原子核质量的千分之一
- ◆ 角色重：电子的分布，决定了物质的结构

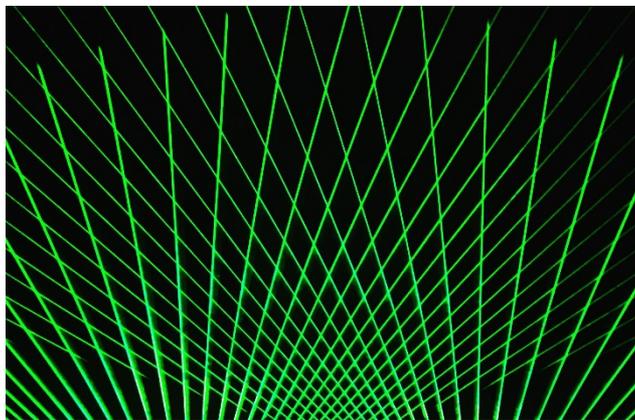
电子和元素



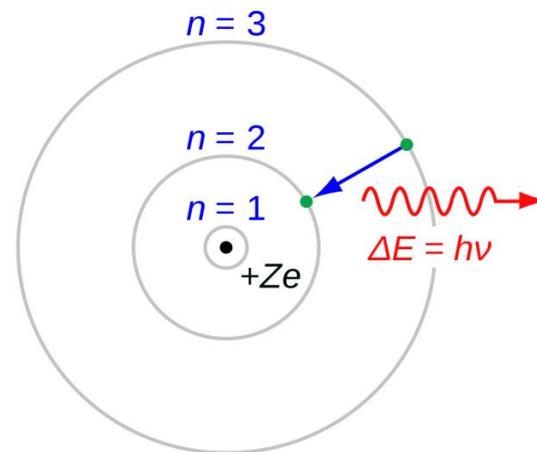
IA 1																	0 18						
1 H 1.0080																	2 He 4.002602						
IIA 2																	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17		
3 Li 6.97	4 Be 9.012182																	5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0069	8 O 15.9994	9 F 18.9984032	10 Ne 20.1797
IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIB 7	VIII 8 9 10						IIB 12	13 Al 26.9815386	14 Si 28.085	15 P 30.973762	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.948						
11 Na 22.98976928	12 Mg 24.3050	21 Sc 44.955912	22 Ti 47.867	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.938045	26 Fe 55.845	27 Co 58.933195	28 Ni 58.6934	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.63	33 As 74.92160	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798						
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.90585	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc [97.9072]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90550	46 Pd 106.42	47 Ag 107.8682	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.90447	54 Xe 131.293						
55 Cs 132.9054519	56 Ba 137.327	57-71 La-Lu *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94788	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.084	79 Au 196.966569	80 Hg 200.59	81 Tl 204.384	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98040	84 Po [208.9824]	85 At [209.9871]	86 Rn [222.0176]						
87 Fr [223.0197]	88 Ra [226.0254]	89-103 Ac-Lr **	104 Rf [261.1088]	105 Db [262.1141]	106 Sg [266.1219]	107 Bh [264.12]	108 Hs [277]	109 Mt [268.1308]	110 Ds [281]	111 Rg [272]	112 Cn [285]	113 Uut [285]	114 Uuq [289]	115 Uup [288]	116 Uuh [289]	117 Uus [291]	118 Uuo [293]						

- ◆ 泡利不相容原理：每个态只能占据一个电子
- ◆ 原子核外电子排布不同，形成不同的元素
- ◆ 电子很大程度上决定了化学性质和物理性质：
化学反应，物体颜色，透明…

认识一下光子



激光：大量光子处于同一状态

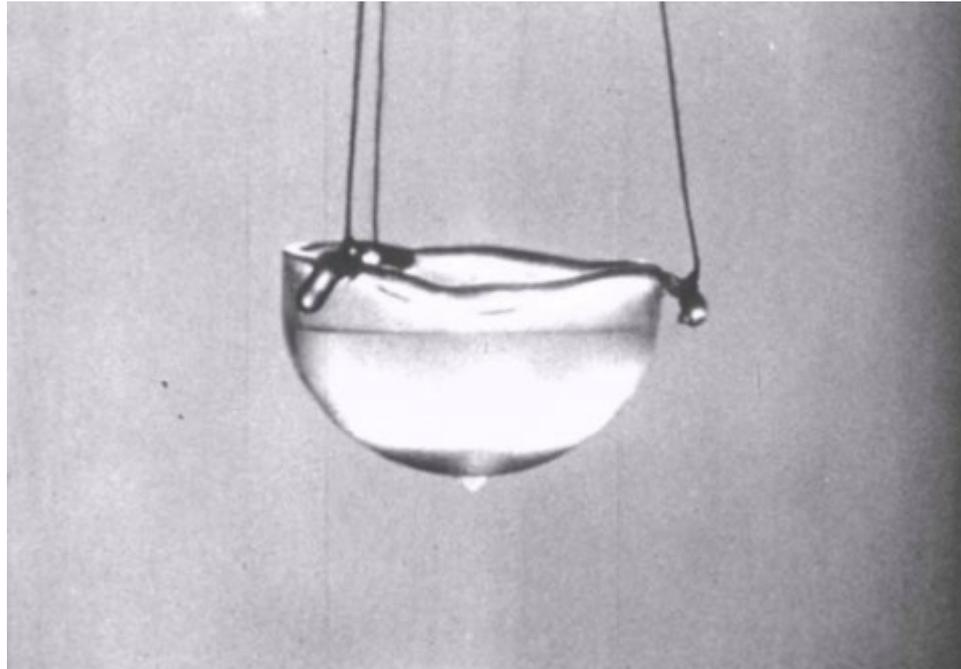


可以被电子吸收或者辐射，光电效应

- 玻色子
- 能量载体，没有质量！
- 每秒三十万公里！速度最快，没有之一！

玻色-爱因斯坦凝聚：超流

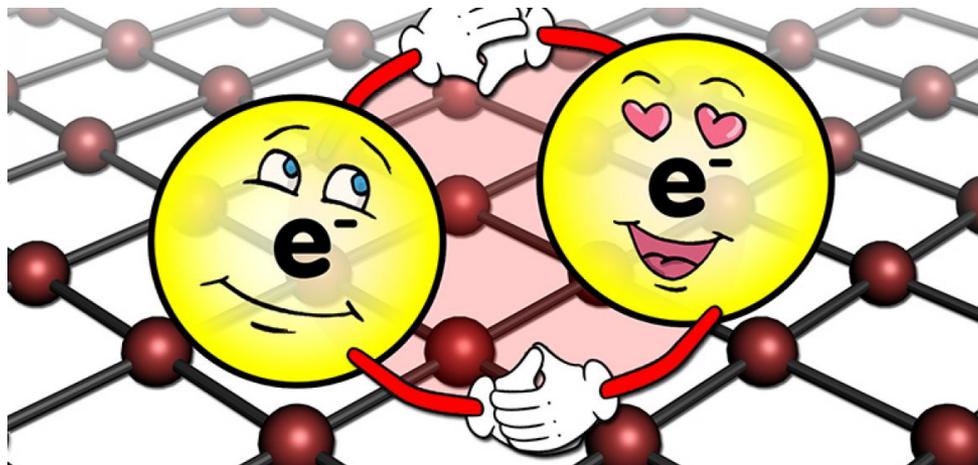
玻色子液体：液氦



- 量子现象的宏观表现
- 液体没有粘滞性
- 沿着器壁爬出容器

玻色—爱因斯坦凝聚：超导

量子现象的宏观表现



库珀对

◆ 超导的BCS理论

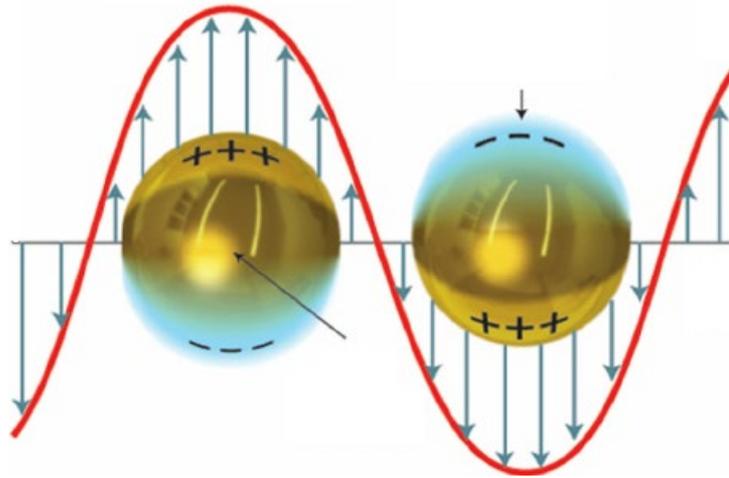
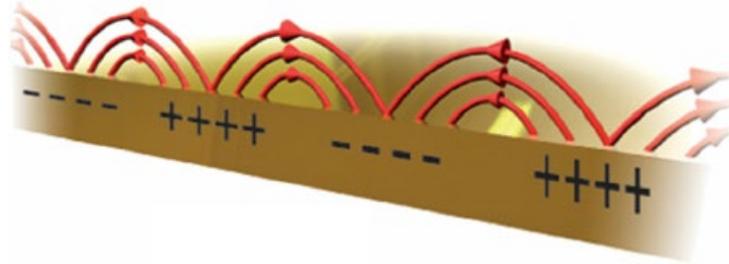
- 电子-晶格-电子 相互作用，晶格作为媒介，两个电子联姻形成一个符合玻色子—库珀对。
- 类似于超流，库珀对没有阻力，表现为超导。
- 库珀对比较脆弱，温度会拆散两个电子。
- 低温下才可以维持。

集体行为的量子性



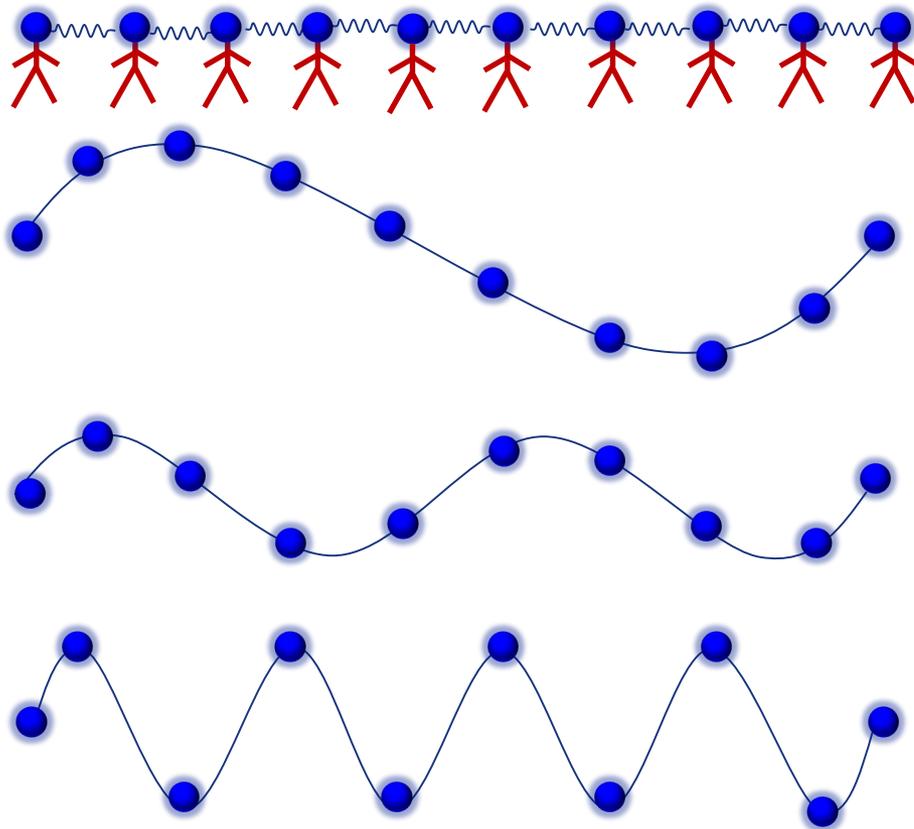
◆ 多粒子相互作用——元激发

集体激发：表面等离子激元



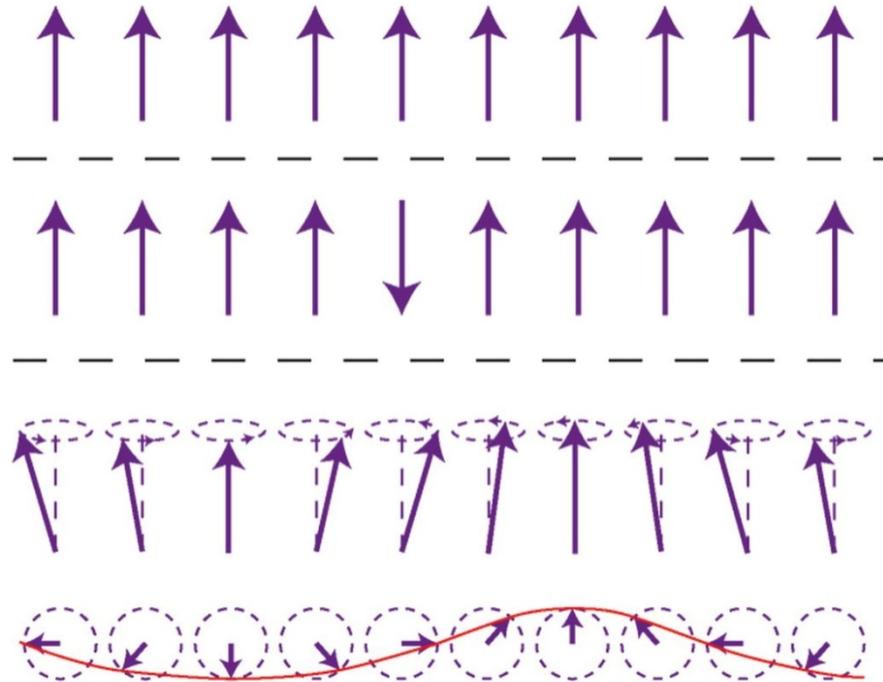
- ◆ 光和电子相互作用形成的震荡
- ◆ 纳米光刻、高密度数据存储、近场光学等

集体激发：声子



- ◆ 振荡模式不连续，量子化，声子。
- ◆ 质心振动-声学声子；正负离子相对振动-光学声子
- ◆ 影响：电阻，比热，声音传播，和电磁波作用

集体激发：自旋波-磁振子



◆ 信息的存储, 传播...

从基本构成，能认知世界吗？

“MORE IS DIFFERENT”

More Is Different

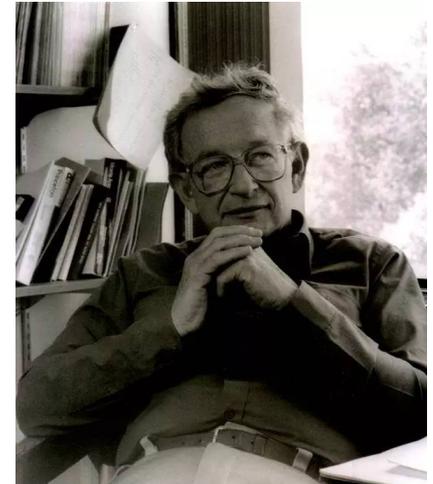
Broken symmetry and the nature of
the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

*“ ... 将万事万物还原成简单的基本规律，
并不意味着从这些规律出发重建宇宙的能力，
不能依据少数粒子的性质简单外推出多粒子
复杂集聚体的行为，相反在复杂体系的每一
一个层次会呈现全新的性质 ... ”*

FITZGERALD: The rich are different
from us.

HEMINGWAY: Yes, they have more
money.



Philip W. Anderson

呈展现象 (emergent phenomena)



物质结构



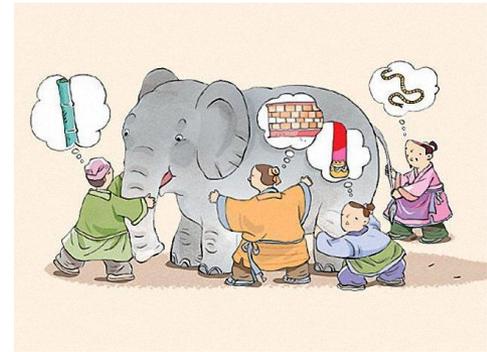
生物群落



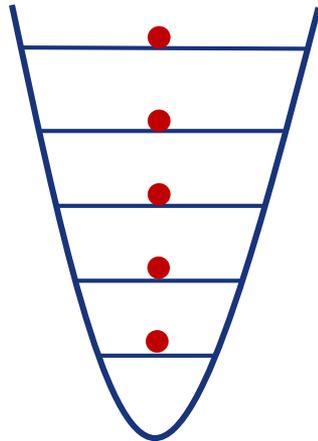
智慧

- ◆ 从简单到复杂，每个层次都有自己的基本规律
- ◆ 组成物质的形态：气态，液态，固态，等离子态，玻色-爱因斯坦凝聚态，费米子凝聚态
- ◆ 认知世界：还原论和整体论的互补

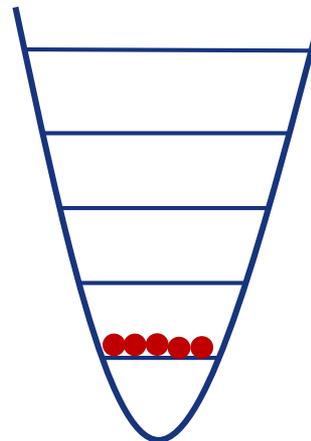
小结



- 量子粒子分两类：费米子（如电子），玻色子（如光子）
- 费米子：费米统计，泡利不相容原理
- 玻色子：玻色统计，可以同处一个状态
- 呈展现象：多粒子体系共同作用



费米子



玻色子