



原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

==现代原子分子物理导论==

原子分子物理发展简史



苑震生, March 5, 2018



目录

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

1 原子分子物理学

2 课程内容

3 原子分子物理学简史

- 汤姆逊和卢瑟福前后的原子物理认识过程
- 玻尔的时代和量子力学推动下的原子分子物理学
- 场量子化下的光子原子相互作用
- 量子调控下的原子分子物理世界

4 在其他学科中的应用

5 主要参考书目和文章



原子分子物理学

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 什么是原子物理学？
- 哲学==>现代科学（数学和物理理论基础、实验检验）
- **原子物理学：**
物理学的一个分支，研究的客体是原子和分子的能级结构、原子中电子-电子的相互作用、电子-原子核的相互作用、原子如何形成分子、原子分子之间的碰撞散射行为及与电磁场的相互作用和动力学过程。
- **标志：**
原子物理学，1913年，玻尔原子模型的提出。
 - 原子物理学 $1 - 10^4$ eV
- 核物理学 MeV量级
- 粒子物理学 GeV以上



宏观到微观的尺度

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

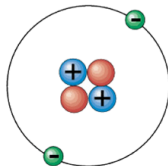
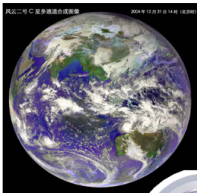
玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



氢原子

- 电子
- 质子
- 中子

玻尔半径 0.53\AA



课程目录

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 第一章 原子分子物理发展简史
- 第二章 单电子原子的结构
- 第三章 单电子原子的光谱
- 第四章 单电子原子的精细结构，以及与外电场和磁场的相互作用
- 第五章 双电子原子和多电子原子的结构
- 第六章 分子结构简介
- 第七章 原子碰撞：基本概念和势散射
- 第八章 原子分子的量子调控简介

原子物理的层次：

传统原子物理-单原子（原子能级及跃迁强度） →
量子光学-原子系综集体态（原子集体态及其性质） →
凝聚态-相互作用量子多体系统（Hubbard模型及能带）



上课方式

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- **上课方式：**
讲课、讨论、课后作业、小论文等
- **原则：**
我一直认为，创新的源动力在于人的思想的创新，而青年人思想创新的潜能也远高于年长者。所以尽量少给他们设定条条框框，在严谨地教授给他们基本概念之后，就是去激发他们使用已有的工具去解决开放的问题，如果原有的工具不具备解决这些问题的条件，他们就需要去开发新的更有效的工具。这本身就是一个创造的过程。



汤姆逊和卢瑟福前后的原子物理认识过程

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

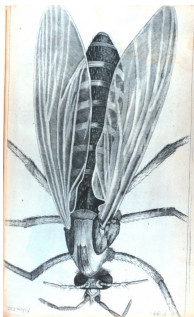
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 认识身边的事物=>力、热、电、光等现象；
苹果砸在头上；被开水烫了，天冷结冰了；皮毛摩擦产生静电；日出日落
- 宏观世界=>宇宙学；
光学望远镜，射电望远镜等
- 微观世界=>原子物理学；
光学显微镜，电子显微镜等





光学显微镜

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 16世纪，荷兰的眼镜商人，Zacharias Janssen
- 一个世纪后，英国自然哲学家、建筑学家、博物学家Robert Hooke对光学显微镜做了系统的研究，并写了一本书叫做《微观图谱(Micrographia)》
- 一个好学的荷兰人Antonie van Leeuwenhoek(1632-1723)正好读了这本书并且十分欣赏Hooke的设计和精美的画作，于是就进一步改良光学显微镜，达到了两百多倍的放大倍率。他也是第一个观察到单细胞生物体、肌肉纤维、病毒、精子、毛细血管中的血流的人。
- 在Wikipedia上对他有这样意思的描述“Van Leeuwenhoek虽然写了很多信件，但是他没有写作任何的书籍”。而更为传奇的是他设计制作的显微镜竟然在其后的近300年中没人能够重复，直到1957年才有人复制了他的设计。



19世纪末的自然科学中心

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 在19世纪末开始，物理学研究进入了一个十分活跃的时期，新的研究成果不断涌现，这其中最具代表性的就是人们向微观世界的探索，一些重要的基本粒子相继被发现。
- 而此时，科学研究的中心是在欧洲一个岛国—英国。汤姆逊（1856-1940）是代表性领军人物，他以发现电子和同位素、发明质谱仪而闻名，于1906年获得诺贝尔物理学奖。



原子的核式模型一、电子的发现

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

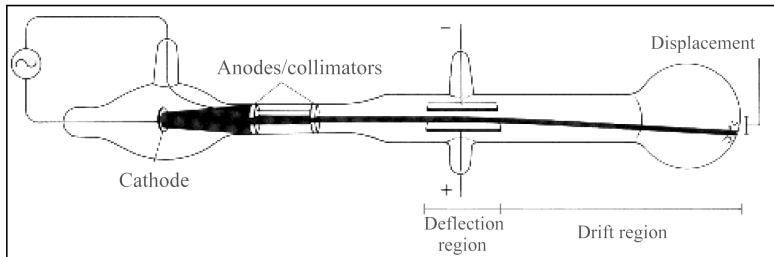
玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



J. J. Thomson和他使用的阴极射线管

电子的荷质比： $e/m = 1.758 \times 10^{11} \text{ c/kg}$

电子的质量： $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$ ，这是正负电子碰撞湮灭产生光子的能量

J. J. Thomson因发现电子而获得1906年的诺贝尔物理学奖:)



原子的核式模型二、 α 粒子散射实验

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

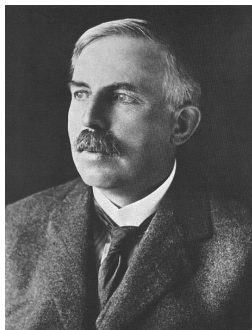
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

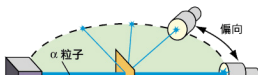
何谓测量？宏观测量（**可以无损测量**，人的眼睛看世界，X光片），微观测量（**一般只能是“有损”测量**，如粒子探针，量子态克隆；提及2012年诺贝尔物理学奖S Haroche和D Wineland；提及有损测量在医学方面的应用，如在重离子源上的医学：德国GSI、日本、美国、中国兰州）。



Ernest

Rutherford(1871-

1937) 1908年获诺贝尔物理学奖





原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 I

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- **如果是汤姆逊模型**（酸枣糕模型）
不考虑其他电子的影响（质量、吸引），则一个电子感受到正电荷的库仑吸引力为

$$F_c = \frac{2e}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{Ze \cdot r^3}{R^3} = \frac{2Ze^2 r}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad (1)$$

- 所以， r 最大时，力最强。根据下面冲量定理和能动量关系

$$\begin{aligned} \Delta p &= p \cdot \theta = F \cdot \Delta t \\ \Delta t &\sim \frac{R}{v}, \quad R \sim 10^{-10} m \\ E &= \frac{1}{2}mv^2, \quad p = mv \end{aligned}$$

(2)



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 II

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 可以得到散射角度

$$\theta = \frac{F \cdot \Delta t}{p} = \frac{2Ze^2R}{4\pi\epsilon_0R^3} \cdot \frac{R}{v} \cdot \frac{1}{mv} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0RE} \quad (3)$$

- 如果 $E = 5\text{MeV}$ ，铂原子 $Z = 78$ ，则有 $\theta = 0.01^\circ$ ，散射角非常之小。所以，**汤姆逊原子模型是不能解释卢瑟福散射实验的！**

- **卢瑟福核式模型**

原子中的正电荷集中在原子中心很小的区域内，并且几乎原子的全部质量集中在这一区域，电子则分布在这一区域外面。

- ① α 粒子的质量比电子大的多，和电子相互作用几乎对其运动没有影响，因此可暂不考虑；



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 III

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

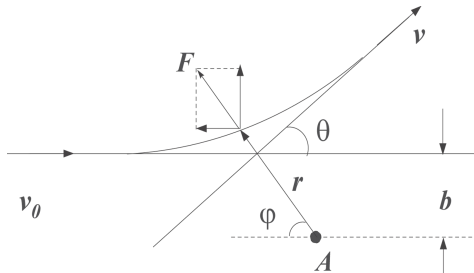
量子调控

学科应用

参考文献

- 2 原子中的正电荷集中在很小的区域内， α 粒子进入原子时，它基本上总是在原子核外，因此受到全部正电荷的作用，它一般受很强作用的机会不大，所以大部分是小角度散射；
- 3 α 粒子可能与正电荷的距离很小，这样正电荷对它的库仑作用力可以很大，因而有可能发生大角度散射

● 卢瑟福散射公式



单个靶原子对入射 α 粒子的散射角：原子质量 M ，电荷 Ze ； α 粒子质量 m ，能量 E ，带有 $2e$ 正电荷，以速度 v 射向靶原子，忽略电子的屏蔽作用（这种忽略电子的模型是不严格的，在小角度会出现问题）；



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 IV

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 靶是重原子， $m \ll M$ ，可以认为原子核基本不动，所以是中心力场，角动量守恒

$$L = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = mv_0 b$$

$$F_{\perp} = F \cdot \sin \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{r^2} \sin \varphi$$

$$F_{\perp} dt = mdv_{\perp} \quad (4)$$

$$\Rightarrow dv_{\perp} = \frac{F_{\perp} dt}{m} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 m} \cdot \frac{2Ze^2}{r^2} \sin \varphi dt$$

- 根据角动量守恒，



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 V

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

$$\begin{aligned}L &= mr^2 \frac{d\varphi}{dt} = mv_0 b \\ \Rightarrow \frac{1}{r^2} &= \frac{1}{v_0 b} \frac{d\varphi}{dt} \\ \therefore dv_{\perp} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 m v_0 b} \cdot 2Ze^2 \cdot \sin\varphi d\varphi\end{aligned}\quad (5)$$

$\therefore M \gg m$, 认为原子核在散射过程中不动, 则 α 粒子散射在无穷远处的动量为 mv_0 , 散射角为 θ , 有



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 VI

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

$$v_{\perp\infty} = v_0 \sin \theta$$

$$v_{\perp} = \int_0^{\pi-\theta} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 m v_0 b} \cdot 2Ze^2 \cdot \sin \varphi d\varphi$$

$$= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m v_0 b} (1 + \cos \theta) = v_0 \sin \theta$$

$$\Rightarrow \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} = \frac{4\pi\epsilon_0 m v_0^2 b}{2Ze^2} = \text{ctg} \frac{\theta}{2}$$

● 设 $D = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{4Ze^2}{m v_0^2}$, 则有,

$$\text{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{2b}{D} \quad (6)$$

b 叫做瞄准距离, $b \uparrow, \theta \downarrow; E \uparrow, D \downarrow, \theta \downarrow$.



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 VII

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

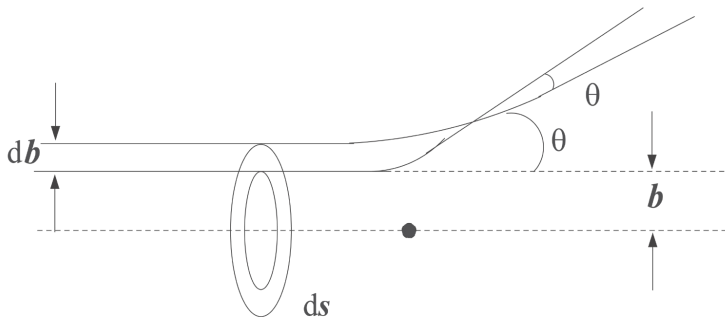
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

实验不能测量单个靶原子散射单个 α 粒子的瞄准距离，所以不能直接得到 θ ，可以根据多次测量的统计结果，得到散射的 α 粒子数和散射角的关系。





原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 VIII

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- $b, b + db$ 范围内的粒子必被散射到 $\theta, \theta - d\theta$, α 粒子打在 db 圆环中的几率正比于其面积

$$d\sigma = 2\pi b|db|$$

所以, 由 $\text{ctg}\frac{\theta}{2} = \frac{2b}{D}$ 得到

$$\begin{aligned} db &= -\frac{D}{4} \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta \\ \Rightarrow d\sigma &= 2\pi b \frac{D}{4} \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta = \frac{\pi D^2 \cos \theta}{4 \sin^3 \frac{\theta}{2}} d\theta \end{aligned} \quad (7)$$



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 IX

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

$(\theta, \theta + d\theta)$ 对应的立体角范围是

$$\begin{aligned}d\Omega &= \frac{2\pi r^2 \sin\theta d\theta}{r^2} = 2\pi \sin\theta d\theta \\ &= 4\pi \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} d\theta \\ \therefore d\sigma &= \frac{D^2}{16} \frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}} d\Omega\end{aligned}\quad (8)$$

- $d\sigma$ 代表 α 粒子被一个靶原子散射到 θ 方向的小立体角 $d\Omega$ 内的几率； $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ 代表散射到 θ 方向上单位立体角内的几率；它们的单位是**面积**。



原子的核式模型三、卢瑟福核式模型 X

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ 是原子物理中反映碰撞特性的最重要的物理量（微观世界中的过程），叫做微分散射截面（Differential Cross Section, DCS）；其单位**巴(b)**， $1\text{ b}=10^{-24}\text{ cm}^2$ ， $1\text{ Mb}=10^{-18}\text{ cm}^2$ 。
- $\int d\sigma = \int \frac{D^2}{16} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} d\Omega$ 代表特定能量入射的 α 粒子被一个原子散射的总截面，或者说被一个靶原子散射的概率。 $D \propto Z$ 和 $D \propto \frac{1}{E}$ ，所以入射能量越高，散射的概率就越小。 0° 的情况。



汤姆逊和卢瑟福

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 汤姆逊和卢瑟福，这两个人是原子分子物理学史早期的教父式的人物。
- 他们是师徒关系，汤姆逊是卢瑟福的老师。
- 他们相继任剑桥大学卡文迪许实验室的主任，并且把该实验室的科学创造能力推向了辉煌的顶峰。
- 他们两个也都被英国王室授予爵位。
- 而更令人推崇的是，他们都桃李满天下。汤姆逊指导的学生中有7位以上获得诺贝尔奖，卢瑟福更有10位弟子获诺贝尔奖。这些都是科学史上的佳话。



科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

此后科学的重心逐渐转向欧洲大陆，但历史却总是以各种各样的方式纪念着这些科学先人们。





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



J. C. Maxwell(1871-1879); L. Rayleigh(1879-1884)



科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



Sir J. J. Thomson(1884-1919); Lord Rutherford(1919-1937)



科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



Sir L. Bragg(1938-1953); Sir N. Mott(1954-1971)



科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



Sir B. Pippard(1971-1984); Sir S. Edwards(1984-1995)



科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





科学的印记

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



- 理学院教授大会，杨院士的问题==>科研方向数5个人
- 等价问题：街上的名字、路标==>教科书上的名字



玻尔的时代和量子力学推动下的原子分子物理学

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

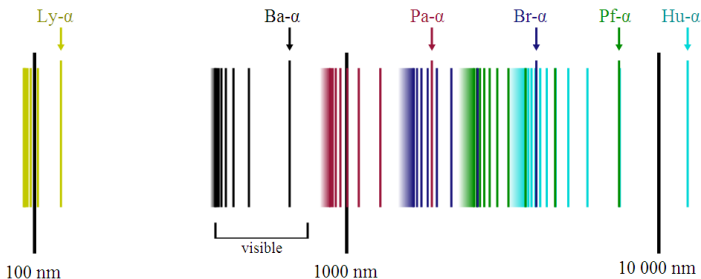
量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 卢瑟福原子模型→行星轨道
- 任意能量 E 就可以把原子激发到相应的行星轨道上去
- 事实并非如此，Electric discharge experiment





玻尔原子模型 I

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

量子化

量子调控

学科应用

参考文献

1 核式模型+定态假设

The electrons can only travel in certain orbits (called by Bohr as the "**stationary orbits**"): at a certain discrete set of distances from the nucleus with specific energies

2 频率条件

The electrons of an atom revolve around the nucleus in orbits. These orbits are associated with definite energies and are also called energy shells or energy levels. Thus, the electrons do not continuously lose energy as they travel in a particular orbit.



玻尔原子模型 II

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

They can only gain and lose energy by jumping from one allowed orbit to another, absorbing or emitting electromagnetic radiation with a frequency ν determined by the energy difference of the levels according to the Planck relation:

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

where h is Planck's constant.

③ 角动量量子化



角动量量子化

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

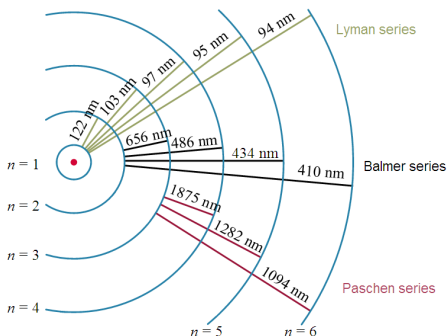
参考文献

- $L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar, \quad n\lambda = 2\pi r$
Louis de Broglie, $\lambda = h/p$



$$E = E_i - E_f = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

- Rydberg Physics, Blockade, Many-Body physics





量子力学

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

能量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 1900年，为了解释黑体辐射“紫外灾难”，Max Planck 引入普朗克常数
- Planck认为仅仅是形式上引入 h 来解释吸收和辐射
- 1905年，Albert Einstein用普朗克假设解释了光电效应
- **Niels Bohr**, Werner Heisenberg, Max Planck, Louis de Broglie, **Albert Einstein**, Erwin Schrödinger, Max Born, John von Neumann, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, David Hilbert, and others
- 多次争论，著名的EPR佯谬→Bell's Inequality
- 1927年，5th **Solvay Conference**，量子力学被广泛接受
- 完美的解释了当时已观测到的氢原子光谱



原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.



索尔维会议

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

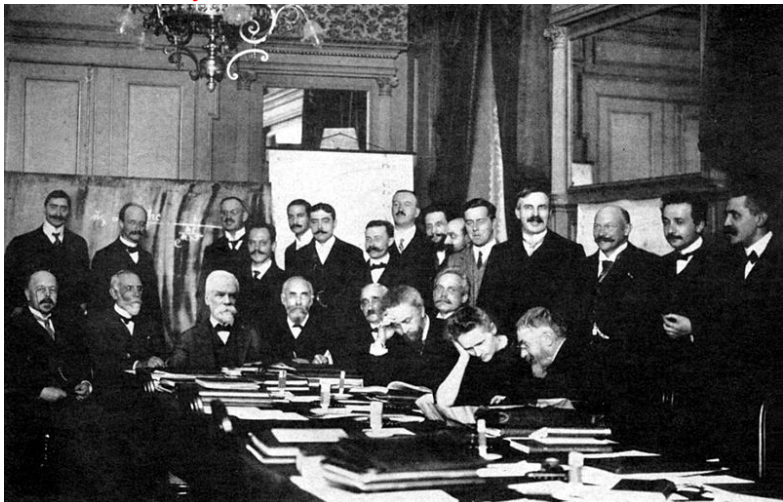
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

比利时, **Solvay Institute**, 1911年第一届





第一届索尔维会议

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

量子化

量子操控

学科应用

参考文献

Photograph of the first conference in 1911 at the Hotel Metropole.

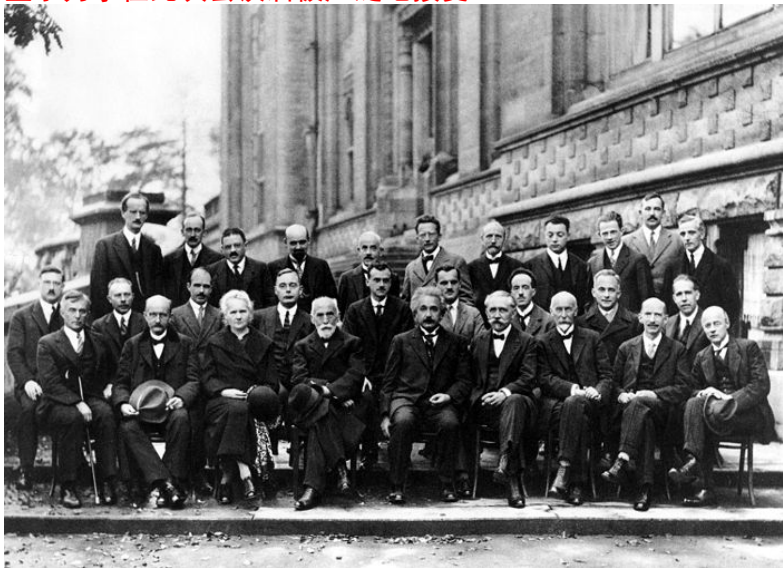
Seated (L-R): W. Nernst, M. Brillouin, E. Solvay, H. Lorentz, E. Warburg, J. Perrin, W. Wien, M. Skłodowska-Curie, and H. Poincaré

Standing (L-R): R. Goldschmidt, M. Planck, H. Rubens, A. Sommerfeld, F. Lindemann, M. de Broglie, M. Knudsen, F. Hasenöhrl, G. Hostelet, E. Herzen, J.H. Jeans, E. Rutherford, H. Kamerlingh Onnes, A. Einstein and P. Langevin.



第五届索尔维会议

量子力学在此次会议后被广泛地接受



原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



第五届索尔维会议

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

Photograph of the fifth conference in 1927

A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, J.E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin; P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr; I. Langmuir, M. Planck, M. Skłodowska-Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson



第25届索尔维会议，2011

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤阿忠和卢慧娟

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献





历届索尔维会议主题

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

No	Year	Title	Chair
1	1911	The theory of radiation and quanta	Hendrik Lorentz (Leiden)
2	1913	The structure of matter	
3	1921	Atoms and electrons	
4	1924	Electric conductivity of metals and related problems	
5	1927	Electrons and photons	
6	1930	Magnetism	Paul Langevin (Paris)
7	1933	Structure properties of the atomic nucleus	
8	1948	Elementary particles	William Lawrence Bragg (Cambridge)
9	1951	The solid state	
10	1954	Electrons in metals	
11	1958	The structure and evolution of the universe	
12	1961	Quantum field theory	



历届索尔维会议主题

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆斯和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

13	1964	The Structure and Evolution of Galaxies	J. Oppenheimer (Princeton)
14	1967	Fundamental Problems in Elementary Particle Physics	R. Møller (Copenhagen)
15	1970	Symmetry Properties of Nuclei	Edoardo Amaldi (Rome)
16	1973	Astrophysics and Gravitation	
17	1978	Order and Fluctuations in Equilibrium and Nonequilibrium Statistical Mechanics	Léon van Hove (CERN)
18	1982	Higher Energy Physics	
19	1987	Surface Science	F. W. de Wette (Austin)



历届索尔维会议主题

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

玻量子化

量子操控

学科应用

参考文献

20	1991	Quantum Optics	Paul Mandel)
21	1998	Dynamical Systems and Irreversibility	Ioannis Antoniou (Brussels)
22	2001	The Physics of Communication	
23	2005	The Quantum Structure of Space and Time	David Gross (Santa Barbara)
24	2008	Quantum Theory of Condensed Matter	Bertrand Halperin (Harvard)
25	2011	The theory of the quantum world	David Gross
26	2014	Astrophysics and Cosmology	Roger Blandford (Stanford)
27	2017	The physics of living matter: Space, time and information in biology	Boris Shraiman (Santa Barbara)



场量子化下的光子原子相互作用

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

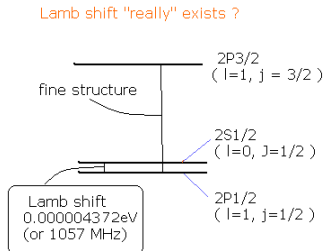
场量子化

量子调控

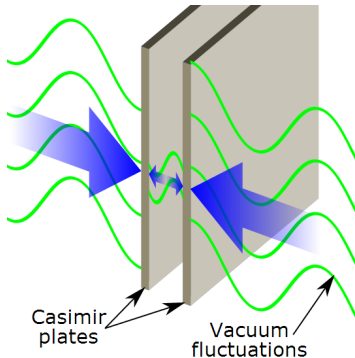
学科应用

参考文献

- 量子力学足以描述微观世界了吗？
- **答案是否定的！**



Lamb Shift



Casimir Effect



场量子化到重整化之路

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 早在1920年开始，Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Eugene Wigner, Pascual Jordan, Werner Heisenberg, Enrico Fermi 就开始了电磁场和电荷的量子化研究。也成功的解释了一些现象。
- 但是其后，又发现简单的进行电磁场量子化并不能使用于任意体系，如高能物理中的需要更高阶的计算时。
- Hans Bethe, Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman, Freeman Dyson重整化理论的研究。



量子场论就够用了吗？

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 标准模型的建立统一了电磁、强、弱相互作用，对称性、规范对称、群论；但是引力还未被统一到这个理论框架中。
- 人们追求大统一的极致理论，其中弦论就是一个有力的候选。
- 虽然在高能物理领域对基本粒子的预言都得到了实验检验，但是标准模型不能解释为什么反物质少于正物质、暗物质为何存在等问题？



宏观的量子现象

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 巨磁阻
- 超导体, BCS-theory, Bardeen, Cooper, Schrieffer
- John Bardeen (1957-Shockley Transistor, 1972-BCS)
- He-3 超流, Douglas D. Osheroff (1945-)
- 1996 Nobel Prize, D. Lee and R. C. Richardson



"It is my great pleasure for sharing the same tree with you!"



量子调控下的原子分子物理世界

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 超冷原子技术，**BEC**玻色-爱因斯坦凝聚
- 单粒子调控（光子，原子，离子）
- **EIT**慢光
- **Optical Lattice**光晶格
- **Attosecond Laser**阿秒激光



BEC玻色-爱因斯坦凝聚

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

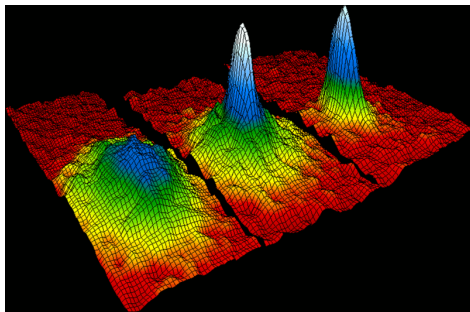
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 超精细光谱和激光技术
- 激光冷却技术的发明
- 蒸发冷却到量子基态，第一个BEC
E. Cornell (JILA), C. Wieman (JILA), Wolfgang Ketterle (MIT)
- 简并费米气体*
- 分子BEC *





BEC通往玻色-爱因斯坦凝聚之路

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



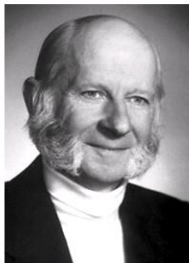
The Nobel Prize in Physics 1989

Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul

📌 The Nobel Prize in Physics 1989	▼
Nobel Prize Award Ceremony	▼
Norman F. Ramsey	▼
Hans G. Dehmelt	▼
Wolfgang Paul	▼



Norman F. Ramsey



Hans G. Dehmelt



Wolfgang Paul

The Nobel Prize in Physics 1989 was divided, one half awarded to Norman F. Ramsey "for the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks", the other half jointly to Hans G. Dehmelt and Wolfgang Paul "for the development of the ion trap technique".



The Nobel Prize in Physics

Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips

📌 The Nobel Prize in Physics	▼
Nobel Prize Award Ceremony	▼
Steven Chu	▼
Claude Cohen-Tannoudji	▼
William D. Phillips	▼



Steven Chu

The Nobel Prize in Physics 1989 was divided, one half awarded to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips "for the development of methods to cool and trap neutral atoms with laser light".



David E Pritchard

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



David E. Pritchard

- is physics professor at the Massachusetts Institute of Technology (MIT). Professor Pritchard carried out pioneering experiments on the interaction of atoms with light that led to the creation of the field of atom optics. His demonstration of the diffraction of a beam of atoms by a grating made of light waves opened the way to studies of the diffraction, reflection, and focusing of matter waves, similar to those with light waves. He has applied atom optics to basic studies of quantum theory, to new methods for studying the properties of atoms, and to the creation of devices such as the atom interferometer and atom wave gyroscope.
- In 1990, he brought Wolfgang Ketterle to MIT as a postdoctoral researcher to work on atom cooling, and stepped aside from that field to allow Ketterle to be appointed to the faculty in 1992. Ketterle pursued atom cooling to achieve Bose-Einstein condensation in 1995, a discovery for which Ketterle was awarded the Nobel Prize in Physics in 2001, along with Eric Cornell and Carl Wieman of JILA, Boulder, CO. Professor Pritchard also mentored Eric Cornell, who was his graduate student.



2012 Nobel Prize—单量子调控

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



The Nobel Prize in Physics 2012 Serge Haroche, David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012

Nobel Prize Award Ceremony

Serge Haroche

David J. Wineland



Photo: U. Montan

Serge Haroche



Photo: U. Montan

David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"*



EIT慢光

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤阿忠和卢基福

玻尔的时代

场量子化

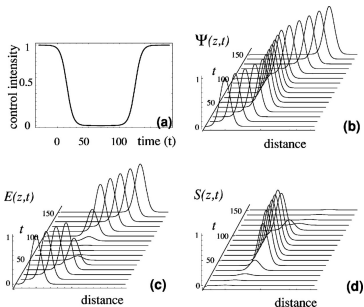
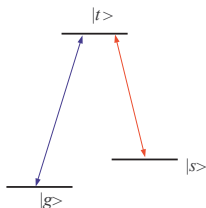
量子调控

学科应用

参考文献



Lene Vestergaard Hau, S. E. Harris, Zachary Dutton, Cyrus H. Behroozi
Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas,
Nature **397**, 594-598 (18 February 1999).





基于慢光的量子存储

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

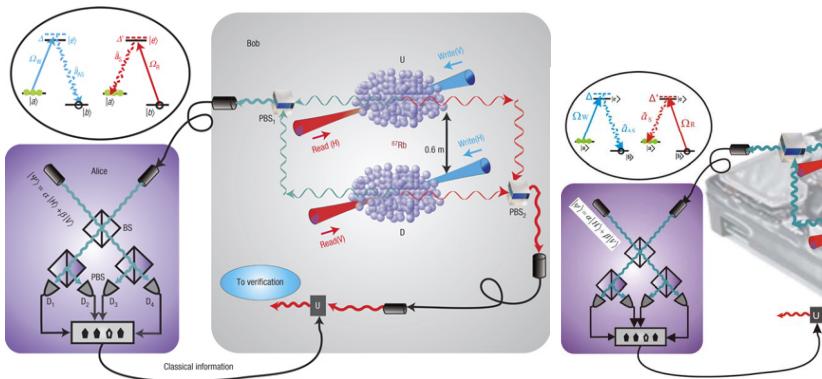
量子调控

学科应用

参考文献

潘建伟USTC-UHEI中德联合研究小组

Nature Physics 2008



2008





光晶格

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

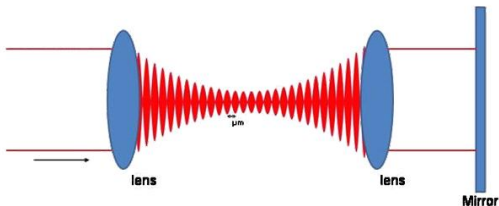
场量子化

量子调控

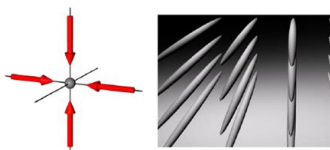
学科应用

参考文献

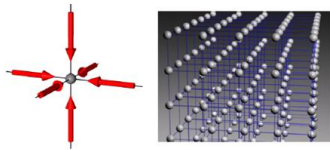
一维光晶格



二维光晶格



三维光晶格





基于光晶格的量子模拟

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

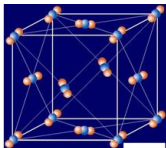
场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 多体系统问题，超大型计算机

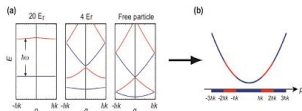
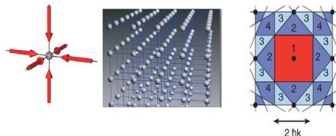


$$\hat{H} = -J \sum_{\langle R, R' \rangle} \hat{a}_R^\dagger \hat{a}_{R'} + \frac{U}{2} \sum_R \hat{n}_R (\hat{n}_R - 1) + \sum_R \epsilon_R \hat{n}_R$$

- 费曼：构造量子系统模拟量子体系本身 (1982)



- 光晶格中的超冷原子



能带结构，布里渊区



光晶格

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

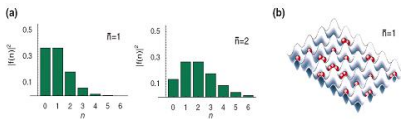
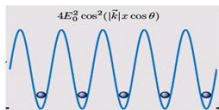
学科应用

参考文献

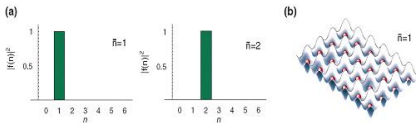
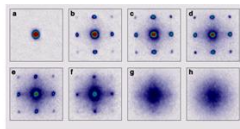
马普所量子光学所I Bloch研究组

光晶格中超冷原子的量子相变，超流态—Mott绝缘态

$$\hat{H} = -J \sum_{\langle \mathbf{R}, \mathbf{R}' \rangle} \hat{a}_{\mathbf{R}}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{R}'} + \frac{U}{2} \sum_{\mathbf{R}} \hat{n}_{\mathbf{R}} (\hat{n}_{\mathbf{R}} - 1) + \sum_{\mathbf{R}} \epsilon_{\mathbf{R}} \hat{n}_{\mathbf{R}}$$



超流态



Mott绝缘态=>量子纠缠





其他的量子调控体系

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 单光子, 中国科大、Univ. Vienna, Univ. Munich, UIUC;
- 单原子, MPQ (Garching), Univ Heid, CNRS (Paris);
- 单离子, Univ. Innsbruck, NIST, Univ. Maryland;
- Attosecond激光, MPQ (Garching), Kansas S. Univ.;



原子、分子、光学的研究中心

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献

- 美国国家标准局NIST, JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics)

<http://www.nist.gov/>

<http://jila.colorado.edu/>

- 美国超冷原子中心

<http://cuaweb.mit.edu/>

- 德国马普学会量子光学研究所

<http://www.mpg.mpg.de/>

- 奥地利因斯布鲁克大学

<http://www.uibk.ac.at/exphys/>

- 法国巴黎CNRS实验室

<http://www.cnrs.fr/>

原子物理的层次：

传统原子物理-单原子（原子能级及跃迁强度）→

量子光学-原子系综集体态（原子集体态及其性质）→

凝聚态-相互作用量子多体系统（Hubbard模型及能带）



原子分子物理在其他学科中的应用

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献

- 等离子物理，如：电子+原子/离子的散射截面信息（美国的核聚变装置点火）；
- 生命科学，如：显微镜、绿色荧光标记（激发、退激发等）、激光手术等；
- 信息科学，如：时频系统、全球GPS网络、量子信息科学；
- 连接**基础科学**+**应用科学**的前沿科学



主要参考书目和文章 I

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆斯和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子操控

学科应用

参考文献



徐克尊, 陈向军, 陈宏芳编著

近代代物理学 (第2版)

中国科学技术大学出版社, 2008, ISBN:

978-7-312-01883-1.



B. H. Bransden and C. J. Joachain

Physics of atoms and molecules (2nd Edition)

Pearson Education Limited, 2003, ISBN: 0-582-35692-X.



Christopher J. Foot

Atomic Physics

Oxford University Press, 2005, ISBN:

978-0-19-850695-9.



D. A. Steck

Rubidium 87 D Line Data

<http://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>



主要参考书目和文章 II

原分简史

苑震生

原子分子物理

上课内容

原分简史

汤姆逊和卢瑟福

玻尔的时代

场量子化

量子调控

学科应用

参考文献



R. Grimm, M. Weidemüller, and Y. B. Ovchinnikov

Optical Dipole Traps for Neutral Atoms

Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics **42**,
95 (2000).



Video

W. Ketterle, 课后作业 Ultracold atoms,

<http://video.mit.edu/watch/bose-einstein-condensates-the-coldest-matter-in-the-universe-9889/>