Джерелом збуджених атомів водню (H*) була атомна гармата. Вона складалась із замкненого об'єму з капілярним отвором. В об'єм напускався водень H_2 при певному тискові. Стінки камери з воднем розжарювалися до температури 2000 К. На розжарених стінках камери молекулярний водень дисоціює на атоми, і крізь капіляр у вакуум іде потік атомів водню. Потік атомів водню перетинався електронним променем. Енергія електронів (***eV***) вибиралась більшою, ніж потенціал збудження атомів водню на рівень $\mathbf{2^2S_{1/2}}$ ($\boldsymbol{eV \le eV_a}$). За допомогою конденсатора з пучка збуджених атомів водню вилучались іони та інші заряджені частинки, так що до колектора могли доходити лише нейтральні частинки, серед яких була значна кількість збуджених атомів водню H*. Детектором потоку збуджених атомів H* був вольфрамовий колектор. Атоми H*, що стикаються з поверхнею вольфраму, віддають йому свою енергію збудження eV_a. Вона достатня для того, щоб електрони вольфраму змогли подолати його поверхневий потенціальний бар'єр і вийти у вакуум, бо $eV_a > e\varphi$, де eφ - робота виходу вольфраму.

$$\mathbf{H^*}(eV_a=10{,}15\ eB) + \mathbf{e}(W) \rightarrow \mathbf{H} + \mathbf{e}(mv^2/2=eV_a) \rightarrow \mathbf{H} + \mathbf{e}(eV_a-e\varphi).$$

Поява вільних електронів біля поверхні вольфраму свідчить, що на ній відбулась релаксація збуджених на метастабільний рівень атомів H*. Внаслідок появи вільних електронів виникає струм у колі колектора ($I_k \neq 0$). Таким чином, вимірюється залежність струму колектора від частоти електромагнітних хвиль ($I_k(\nu)$, які опромінюють потік атомів H*. Ця залежність наведена на схематичному рис.10.5.

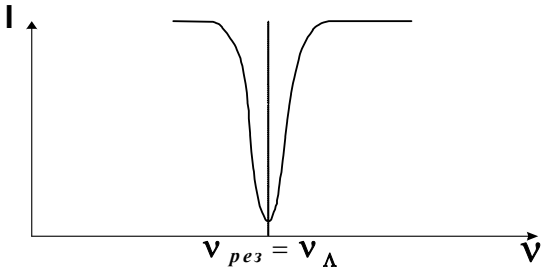

Рис.10. 5. Залежність струму детектора від частоти електромагнітних хвиль, що опромінюють потік збуджених атомів водню.

Вона має вигляд, притаманний резонансним явищам. Резонансна частота виявилась такою, що дорівнює $\boldsymbol{\nu_{рез}=\nu_\Lambda=}$ **1,0579** ***Ггц,*** $\boldsymbol{h\nu_\Lambda=}$ $\boldsymbol{4{,}3\times10^{-6}}$ ***еВ,*** $\boldsymbol{\lambda_\Lambda}$ **= 28** ***см***. Отже, ці досліди дозволили дійти до висновку, ***що рівні*** $\boldsymbol{2^2S_{1/2}}$ ***і*** $\boldsymbol{2^2P_{1/2}}$ ***не вироджені, тобто вони зсунуті один відносно одного на величину*** $\boldsymbol{4{,}3\times10^{-6}}$ ***еВ.*** Цей зсув на поря-

док величини менший від зсуву, що викликається тонкою структурою ($\Delta E_{\Lambda\alpha} < \Delta E_{тон.\ стр.}$).

$$\Delta E_\Lambda = m_0 c^2 \alpha^5 \ln(1/\alpha)$$

$$\frac{\Delta E_\Lambda}{\Delta E_{thin}} \approx \alpha \ln \alpha \approx 4 \times 10^{-2}, \qquad (10.3)$$

де α - стала тонкої структури. На рис.10.6 наведено структуру термів атома водню, зв'язаних з головною лінією серії Лаймана, її тонка і надтонка структури а також лембівський зсув термів, а відповідні величини у таблиці 10.3.

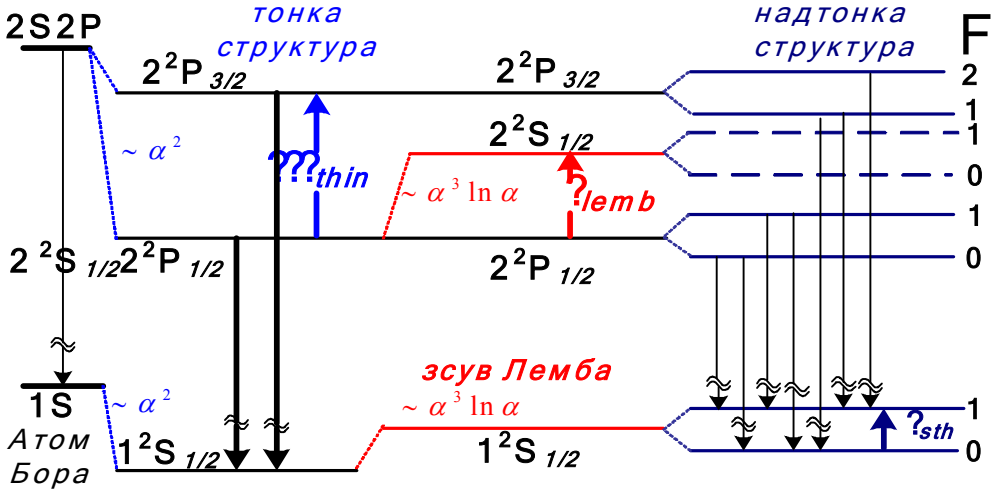

Рис.10.6. Схема термів, на якій показаний лембівський зсув.

Сучасні дослідження лембівського зсуву в подібних до водню системах, таких, як багатократно іонізовані атоми аргону (Ar^{+17}), показали, що лембівський зсув збільшується пропорційно четвертій степені атомного номера Z.

Таблиця10.3. Результати дослідів Лемба і Різерфорда

Н. Бор	**Тонка структура ν_{th}**	***Зсув Лемба ν_{lemb}***	**Надтонка структура ν_{sth}**
ΔE=10,15*еВ* **λ=112,3*нм***	**$h\nu_{th}$=45*мкеВ*** **$\lambda_б$ = 2,74 *см*** **ν_{th}=10969 *Мгц***	***$h\nu_\Lambda$=4,3мкеВ*** ***λ_Λ = 28 см*** ***ν_Λ=1057,9 Мгц***	**$h\nu$=5,2*мкеВ*** **$\lambda_в$ = 20,8 *см*** **$\nu_{нт}$=1420 *Мгц***

проходить від їх виникнення до загибелі, можуть мати енергію, яка не визначається законом збереження енергії, бо невизначеність енергії ΔE може бути сумірною й навіть більшою за енергію E при $\Delta t \to 0$

$$E \sim h\nu = \Delta E \sim h/\Delta t\,.$$

Віртуальні частинки існують дуже короткий час. Але це не перешкоджає експериментальному визначенню наслідків їх взаємодії з реальними частинками. Для характеристики цієї взаємодії виникло поняття ***фізичного вакууму***, якому не надається ніяких механічних властивостей. Фізичний вакуум це не „пустота". Він заповнений віртуальними фотонами та іншими віртуальними частинками. Згідно квантової теорії поля ***фізичним вакуумом*** *називається основний стан квантових полів, який має енергію, мінімальний імпульс, кутовий момент, електричний заряд та інші квантові числа. Він є суперпозицією нульових коливань квантового поля. Вакуум – це своєрідний „резервуар", із якого беруться різні частинки при їх народженні, й куди вони „переходять" при їх анігіляції.*

Розрізняють декілька фізичних вакуумів: електромагнітний (або фотонний), електронно-позитронний, π-мезонний, тощо. Кожна дійсна частинка у фізичному вакуумі оточена віртуальними частинками – „привидами". Між дійсними та віртуальними частинками існує взаємодія, наслідки якої виявляються спеціальними експериментами. Для пояснення лембівського зсуву достатньо обмежитися розглядом електромагнітного (фотонного) вакууму. Електромагнітне поле віддає свою енергію квантами $h\nu$ до тих пір, поки їх кількість не стає нульовою, але енергія поля в цьому стані не дорівнює нулю, а дорівнює $\hbar\omega_0/2$. Цей стан називається електромагнітним (або фотонним) вакуумом. Кожний електрон у ньому оточений хмарою віртуальних фотонів, які він випромінює та вбирає. Обмін віртуальними фотонами відповідає за появу дальнодіючих кулонівських сил. Поля у вакуумі зсувають дійсні та віртуальні частинки, що призводять до поляризації вакууму.

Уперше теоретичне пояснення лембівського зсуву запропонував німецький фізик, лауреат Нобелівської премії 1966 року Ганс Бете. У подальшому воно неодноразово перевірялося та вдосконалювалося іншими авторами й було встановлено, що *основною причиною появи лембівського зсуву є взаємодія електронів у атомі із флуктуа-*

розсіяння частинок і навіть електростатична взаємодія зарядів є результатом ***обміну частинок віртуальними фотонами.***

ціями електромагнітного поля, тобто взаємодія з електромагнітним вакуумом. Випромінювання та вбирання віртуальних фотонів призводить до „розмазування" електрона. Електрон під час свого руху в атомі наближається й віддаляється від атомного ядра. Він начебто „тремтить". При цьому змінюється його потенціальна енергія.

$$\Delta U = \frac{e^2}{r \pm \Delta r} - \frac{e^2}{r} = \frac{e^2}{r\left(1 \pm \frac{\Delta r}{r}\right)} - \frac{e^2}{r} \cong \frac{\pm e^2 \Delta r}{r^2}. \qquad (10.6)$$

З формули (10.6) видно, що чим менше r, тобто чим ближче електрон до атомного ядра, тим більше зміна ΔU при "тремтінні". Електрон у $^2S_{1/2}$ стані знаходиться в середньому ближче до ядра, ніж у $^2P_{1/2}$ стані, тому $^2S_{1/2}$ стан буде сильніше зсуватись при його взаємодії з вакуумом, ніж стан $^2P_{1/2}$.

Оцінимо величину лембівського зсуву. Внаслідок "тремтіння" або розмазаності електрона кулонівський потенціал поблизу атомного ядра буде змінюватись. Запишемо рівняння Пуассона

$$U + \delta U = e\Phi(r + \Delta r). \qquad (10.7)$$

Розвинемо ліву частину (10.7) у ряд

$$U + \delta U = e\left\{\Phi(r) + \Delta r \nabla\Phi(r) + 1/2(\Delta r)^2 \nabla^2\Phi(r) + \ldots\right\}. \qquad (10.8)$$

З (10.8) маємо

$$\delta U = e\Delta r \nabla\Phi(r) + 1/2 e(\Delta r)^2 \nabla^2\Phi(r) + \ldots \qquad (10.9)$$

Знайдемо середнє значення правої та лівої частин співвідношення (10.9) за тремтінням електрона, враховуючи, що

$$<\Delta r> = 0, \quad <\Delta x>^2 = <\Delta y>^2 = <\Delta z>^2 = 1/3<\Delta r>^2.$$

Тоді

$$< \delta U >= (e/6) < (\Delta r)^2 > \nabla^2 < \Phi(r) > \qquad (10.10)$$

Рівняння Пуассона для $\Phi(r)$ має вигляд

$$\nabla^2\Phi(r) = 4\pi e \delta_1(r) \qquad (10.11)$$

де $\delta_1(r)$ - дельта функція Дірака. Підставивши (10.11) у (10.10), маємо

$$\langle \delta U \rangle = \frac{4\pi e^2}{6} < \Delta r^2 > \delta_1(r). \qquad (10.12)$$

Середнє значення енергії електрона, що "тремтить"

а найбільш точні експериментальні дані: ***862МГц, тобто є непогане узгодження експерименту й розрахунку.***
Останнім часом проводились вимірювання лембівського зсуву також для інших одноелектронних систем, наприклад, для 17 кратно іонізованого аргону Ar^{17+} з $Z = 18$, й були отримані такі дані

$$\nu_{тор.} = 36{,}25 \div 39{,}00 \quad Тгц$$
$$\nu_{експер} = 36{,}0 \quad Тгц.$$

Таким чином, отримано узгодження теорії й експерименту як для залежності зсуву від Z і квантового числа n, так і для абсолютного значення величин зсуву. Різниця між теоретичним і експериментальним значеннями становить < 10^{-3} Мгц.

Вивчення лембівського зсуву стимулювало подальший розвиток квантової електродинаміки й підтвердило гіпотезу про реальність фізичного вакууму. Крім того, перевірялась наявність у фотона маси m_γ, що не дорівнює нулю, а також закон Кулона. Зокрема, було показано, що при відхиленні закону Кулона від квадратичного на атомних відстанях (напруженість електричного поля $\mathcal{E} \sim e/r^{2\pm q}$) навіть при $q \sim 10^{-9}$ розрахункове значення лембівського зсуву значно перевищує експериментальне. Отже, на атомних відстанях відхиленнями від квадратичного закону Кулона можна знехтувати. Сучасні оцінки дають для q величину меншу за 10^{-11} ($q < 10^{-11}$). Дослідами Резерфорда з розсіяння α - частинок і в дослідах із розсіяння електронів на рентгенівських фотонах було встановлено, що закон Кулона справедливий принаймні для відстаней між зарядами $r < 10^{-12}$ *см.* На цих відстанях починають діяти ядерні сили, котрі можуть змінити характер взаємодії. Проте не було впевненості, що закон Кулона навіть за відсутності ядерних сил справедливий на менших відстанях. На відстанях, менших класичного радіуса електрона, частинка не може розглядатись, як точковий об'єкт, тому що вона частину часу знаходиться в стані "частинка плюс пари частинок". Кожна частинка оточена хмарою віртуальних частинок, розмір якої оцінюється за допомогою комптонівської довжини хвилі $\Lambda \sim h/mc$, де m – маса віртуальної частинки. Комптонівська довжина хвилі Λ визначає масштаб просторових неоднорідностей, при яких стають суттєвими квантові релятивіські ефекти. Вони повинні описуватись квантовою електродинамікою. Заряджені частинки (наприклад, електрони) обмінюються віртуальними фотонами. Один із зарядів випромінює віртуальний фотон, а другий цей фотон поглинає. Обмін фотонами змі-