BUKU RANCANGAN PENGAJARAN (BRP)

MATA KULIAH

MEKANIKA KUANTUM RELATIVISTIK

oleh

Prof. Dr. Terry Mart

Program Studi S1 Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia
Depok
Desember 2017

PENGANTAR

Mata kuliah Mekanika Kuantum Relativistik merupakan mata kuliah semester 7 untuk mahasiswa yang telah menyelesaikan mata kuliah Mekanika Kuantum 2 (Non-Relativistik). Selama 12 minggu mahasiswa menerima materi perkuliahan tentang transisi dari mekanika kuantum non-relativistik ke mekanika kuantum relativistik, persamaan Klein-Gordon, formulasi kovarian persamaan Maxwell, persamaan Dirac, serta aplikasi ketiga persamaan pada proses hamburan berenergi tinggi (relativistik). Dalam kuliah ini juga akan dibahas formulasi diagram Feynman untuk memudahkan perhitungan. Selama 12 minggu perkuliahan akan diberikan paling sedikit 6 kali tugas yang dikerjakan di rumah. Setelah mendapatkan materi dan mengerjakan tugas-tugas tersebut mahasiswa memilih satu topik tugas proyek yang harus ditulis hasilnya dalam bentuk makalah serta dipresentasikan di depan dosen pada minggu ke 13 dan 14.

Setelah menyelesaikan kuliah Mekanika Kuantum Relativistik, mahasiswa diharapkan mampu menghitung formula reaksi-reaksi hamburan relativistik yang melibatkan fermion dan boson. Umumnya kemampuan ini akan sangat menunjang mahasiswa peminatan Fisika Nuklir dan Partikel Teoretis dalam mengerjakan penelitian Tugas Akhir (TA).

Depok, 8 September 2013

Prof. Dr. Terry Mart

I. Informasi Umum

1.	Nama Program Studi / Jenjang Studi	:	Fisika / S1
2.	Nama Mata Kuliah	:	Mekanika Kuantum Relativistik
3.	Kode Mata Kuliah	:	SCFI604411
4.	Semester Ke-	:	7
5.	Jumlah SKS	:	4 SKS
6.	Metode Pembelajaran	:	Kuliah Interaktif, Diskusi, dan Presentasi
7.	Mata Kuliah yang Menjadi Prasyarat	:	Mekanika Kuantum 2
8.	Menjadi Prasyarat untuk Mata Kuliah	:	-
9.	Integrasi Antara Mata Kuliah	:	-
10.	Dosen Pengampu	:	Prof. Dr. Terry Mart
11.	Deskripsi Mata Kuliah	:	Menjelaskan konsep-konsep dan perumusan-perumusan mekanika kuantum relativistik serta melatih kemampuan mahasiswa dalam menerapkan konsep-konsep tersebut pada masalah-masalah fisika nuklir dan partikel.

II. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK) dan Kemampuan pada Akhir Tahap Pembelajaran (Sub-CPMK)

A. CPMK

Setelah menyelesaikan mata kuliah ini, mahasiswa mampu menerapkan konsep-konsep dan perumusan-perumusan mekanika kuantum relativistik pada masalah-masalah fisika nuklir dan partikel, seperti hamburan relativistik yang melibatkan fermion dan boson.

B. Sub-CPMK

Setelah menyelesaikan mata kuliah ini, mahasiswa mampu:

1. Menghitung perubahan nilai observable (misalnya energi harapan) akibat gangguan bebas- dan bergantung-waktu.
    a) Menghitung energi osilator harmonik dengan menggunakan metode operator Dirac, $\hat{a}$ dan $\hat{a}^{\dagger}$,
    b) Menghitung perubahan observabel karena adanya gangguan akibat potensial kecil yang tidak bergantung-waktu,
    c) Menghitung perubahan observabel karena adanya gangguan akibat potensial kecil yang bergantung-waktu,
    d) Menghitung perubahan nilai observable dengan menggunakan teknik integral biasa atau dengan metode operator Dirac, $\hat{a}$ dan $\hat{a}^{\dagger}$,
    e) Menulis sifat-sifat fungsi delta-Dirac secara matematis,
2. Menulis dan menjelaskan notasi relativistik.
    a) Menulis vektor-empat A^{μ}dan menjelaskan perbedaannya dengan vektor tiga **A**.
    b) Mereduksi keempat persamaan Maxwell yang umum dikenal dalam medan elektromagnetik ke dalam satu persamaan Maxwell kovarian.
    c) Menuliskan dan menjelaskan persamaan gelombang foton.
    d) Menggunakan metode substitusi minimal untuk menurunkan persamaan dinamis sebuah elektron dalam medan magnetik.
    e) Menjelaskan variabel-variabel Mandelstam.
    f) Menggunakan variabel-variabel Mandelstam untuk proses-proses yang memiliki simetri silang (crossing symmetry).
3. Menjelaskan dan menggunakan persamaan Klein-Gordon.
    a) Menurunkan dan menjelaskan persamaan Klein-Gordon.
    b) Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Klein-Gordon.
    c) Menjelaskan interaksi partikel dengan medan elektromagnetik dengan menggunakan metode substitusi minimal pada persamaan Klein-Gordon.

d) Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dari partikel-titik tanpa spin dengan distribusi muatan $A^{\square}$ dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon.
e) Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dua partikel-titik tanpa spin dengan dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon.
f) Menghitung hamburan Compton partikel titik tanpa spin
g) Menurunkan aturan-aturan Feynman untuk hamburan Coulomb partikel tanpa spin
h) Menghitung laju peluruhan suatu proses.

4. Menjelaskan dan menggunakan persamaan Dirac
   a) Menjelaskan penurunan persamaan Dirac serta komponen-komponennya.
   b) Menjelaskan dan menurunkan sifat-sifat matriks Dirac $\square^{\square}$.
   c) Menghitung persamaan-persamaan yang diturunkan dari matriks Dirac $\square^{\square}$.
   d) Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Dirac.
   e) Menurunkan solusi persamaan Dirac untuk partikel bebas (tanpa potensial).
   f) Menjelaskan interpretasi Dirac dan Feynman tentang energi negatif.
   g) Menurunkan relasi kelengkapan.
   h) Menurunkan operator proyeksi spin
   i) Menggunakan persamaan Dirac untuk menghitung amplitudo hamburan Coulomb untuk partikel yang memiliki spin.
   j) Menurunkan relasi-relasi pada aljabar *trace*.
   k) Menurunkan formula observabel polarisasi
   l) Menghitung amplitudo serta penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron dan positron.
   m) Menghitung amplitudo serta penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron-muon serta elektron-elekron.
   n) Menurunkan amplitudo proses anihilasi elektron-positron serta menghitung penampang lintangnya.
   o) Menurunkan amplitudo hamburan Compton partikel berspin.
   p) Menurunkan aturan Feynman untuk hamburan yang melibatkan partikel berspin.

III. Rencana Pembelajaran

Minggu Ke	Sub-CPMK	Bahan Kajian	Metode Pembelajaran	Waktu yang Dibutuhkan	Pengalaman Belajar (*O-L-U)	Bobot Penerapan Sub-CPMK Pada MK (%)	Indikator Pencapaian Sub-CPMK	Referensi
1	1	Menghitung energi osilator harmonik dengan menggunakan metode operator Dirac, $\hat{a}$ dan $\hat{a}^{\dagger}$,	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		
2	2	1. Menulis vektor-empat A^{μ} dan menjelaskan perbedaannya dengan vektor tiga **A**. 2. Mereduksi keempat persamaan Maxwell ke dalam satu persamaan Maxwell kovarian.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		
3	3	1. Menuliskan dan menjelaskan persamaan gelombang foton. 2. Menggunakan metode substitusi minimal untuk menurunkan persamaan dinamis sebuah elektron dalam medan magnetik.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		

4	4	1. Menjelaskan variabel-variabel Mandelstam. 2. Menggunakan variabel-variabel Mandelstam untuk proses-proses yang memiliki simetri silang (*crossing symmetry*).	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		
5	5	1. Menurunkan dan menjelaskan persamaan Klein-Gordon. 2. Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Klein-Gordon.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		
6	6	1. Menjelaskan interaksi partikel dengan medan elektromagnetik dengan menggunakan metode substitusi minimal pada persamaan Klein-Gordon. 2. Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dari partikel-titik tanpa spin dengan	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	10		

		distribusi muatan A^{μ} dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon.						
7	7	1. Melanjutkan penghitungan amplitudo hamburan Coulomb dari partikel-titik tanpa spin dengan distribusi muatan A^{μ} dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon. 2. Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dua partikel-titik tanpa spin dengan dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	10		
8								
9	8	1. Menghitung hamburan Compton partikel titik tanpa spin 2. Menurunkan aturan-aturan Feynman untuk	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	10		

		hamburan Coulomb partikel tanpa spin 3. Menghitung laju peluruhan suatu proses.						
10	9	1. Menjelaskan penurunan persamaan Dirac serta komponen-komponennya. 2. Menjelaskan dan menurunkan sifat-sifat matriks Dirac γ^{μ}.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	10		
11	10	1. Melanjutkan penjelaskan dan menurunkan sifat-sifat matriks Dirac γ^{μ}. 2. Menghitung persamaan-persamaan yang diturunkan dari matriks Dirac γ^{μ}.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	10		
12	11	1. Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Dirac. 2. Menurunkan solusi persamaan Dirac untuk partikel bebas (tanpa potensial).	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		

		3. Menjelaskan interpretasi Dirac dan Feynman tentang energi negatif. 4. Menurunkan relasi kelengkapan.						
13	12	1. Menurunkan operator proyeksi spin 2. Menggunakan persamaan Dirac untuk menghitung amplitudo hamburan Coulomb untuk partikel yang memiliki spin.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	4		
14	13	1. Menurunkan relasi-relasi pada aljabar trace. 2. Menurunkan formula observabel polarisasi 3. Menghitung amplitudo serta penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron dan positron. 4. Menghitung amplitudo serta	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	6		

		penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron-muon serta elektron-elekron.						
15	14	1. Menurunkan amplitudo proses anihilasi elektron-positron serta menghitung penampang lintangnya. 2. Menurunkan amplitudo hamburan Compton partikel berspin.	Kuliah mimbar	2x50 menit	70% O, 20% L, 10%U	4		
16	**Ujian Akhir Semester**							

*) O : Orientasi
L : Latihan
U : Umpan Balik

Referensi:

1. F. Halzen and A. D. Martin, *Quarks & Leptons*, John Wiley & Sons, 1984.
2. J. D. Bjorken and S. D. Drell, *Relativistic Quantum Mechanics*, Mc Graw-Hill, 1964.
3. I. J. R. Aitchison, *Relativistic Quantum Mechanics*, Macmillan, 1982.
4. F. Gross, *Relativistic Quantum Mechanics and Field Theory*, John Wiley & Sons, 1993.

IV. Rancangan Tugas dan Latihan

Minggu Ke	Nama Tugas	Sub-CPMK	Penugasan	Ruang Lingkup	Cara Pengerjaan	Batas Waktu	Luaran Tugas yang Dihasilkan
1	Menghitung perubahan nilai observable (misalnya energi harapan) akibat gangguan bebas- dan bergantung-waktu.	1	Tugas Kelompok	1. Menghitung energi osilator harmonik dengan menggunakan metode operator Dirac, â dan â†, 2. Menghitung perubahan observabel karena adanya gangguan akibat potensial kecil yang tidak bergantung-waktu, 3. Menghitung perubahan observabel karena adanya gangguan akibat potensial kecil yang bergantung-waktu, 4. Menghitung perubahan nilai observable dengan menggunakan teknik integral biasa atau dengan metode operator Dirac, â dan â†, 5. Menulis sifat-sifat fungsi delta-Dirac secara matematis,	Di kelas/ berkelompok, Mandiri dan Online	2x50 menit	
2	**Menulis dan menjelaskan notasi relativistik.**	2	Tugas Kelompok	1. Menulis vektor-empat A^{μ} dan menjelaskan perbedaannya dengan vektor tiga A. 2. Mereduksi keempat persamaan Maxwell yang umum dikenal dalam medan elektromagnetik ke dalam satu persamaan Maxwell kovarian. 3. Menuliskan dan menjelaskan persamaan gelombang foton. 4. Menggunakan metode substitusi minimal untuk menurunkan persamaan dinamis sebuah elektron dalam medan magnetik. 5. Menjelaskan variabel-variabel Mandelstam.	Di kelas/ berkelompok, Mandiri dan Online	2x50 menit	

				Menggunakan variabel-variabel Mandelstam untuk proses-proses yang memiliki simetri silang (crossing symmetry).			
3	Menjelaskan dan menggunakan persamaan Klein-Gordon.	3	Tugas Kelompok	1. Menurunkan dan menjelaskan persamaan Klein-Gordon. 2. Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Klein-Gordon. 3. Menjelaskan interaksi partikel dengan medan elektromagnetik dengan menggunakan metode substitusi minimal pada persamaan Klein-Gordon. 4. Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dari partikel-titik tanpa spin dengan distribusi muatan A^{μ} dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon. 5. Menghitung amplitudo hamburan Coulomb dua partikel-titik tanpa spin dengan dengan menggunakan persamaan Klein-Gordon. 6. Menghitung hamburan Compton partikel titik tanpa spin 7. Menurunkan aturan-aturan Feynman untuk hamburan Coulomb partikel tanpa spin 8. Menghitung laju peluruhan suatu proses.	Di kelas/ berkelompok, Mandiri dan Online	2x50 menit	

4	Menjelaskan dan menggunakan persamaan Dirac	4	Tugas Kelompok	1. Menjelaskan penurunan persamaan Dirac serta komponen-komponennya. 2. Menjelaskan dan menurunkan sifat-sifat matriks Dirac γ^{μ}. 3. Menghitung persamaan-persamaan yang diturunkan dari matriks Dirac γ^{μ}. 4. Menghitung arus kerapatan dan peluang dari persamaan Dirac. 5. Menurunkan solusi persamaan Dirac untuk partikel bebas (tanpa potensial). 6. Menjelaskan interpretasi Dirac dan Feynman tentang energi negatif. 7. Menurunkan relasi kelengkapan. 8. Menurunkan operator proyeksi spin 9. Menggunakan persamaan Dirac untuk menghitung amplitudo hamburan Coulomb untuk partikel yang memiliki spin. 10. Menurunkan relasi-relasi pada aljabar trace. 11. Menurunkan formula observabel polarisasi 12. Menghitung amplitudo serta penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron dan positron.	Di kelas/ berkelompok, Mandiri dan Online	2x50 menit	

				13. Menghitung amplitudo serta penampang lintang hamburan Coulomb untuk elektron-muon serta elektron-elekron. 14. Menurunkan amplitudo proses anihilasi elektron-positron serta menghitung penampang lintangnya. 15. Menurunkan amplitudo hamburan Compton partikel berspin. 16. Menurunkan aturan Feynman untuk hamburan yang melibatkan partikel berspin.			

V. Kriteria Penilaian (Evaluasi Hasil Pembelajaran)

Bentuk Evaluasi	Sub-CPMK	Instrumen/Jenis Asesmen	Frekuensi	Bobot Evaluasi (%)
Tugas Mandiri	1-4	Lembar jawaban	0	20
Tugas Kelompok	5-6	Bahan Presentasi dan Presentasi	14	30
Ujian Tengah Semester	1-3	Lembar jawaban	1	30
Ujian Akhir Semester	4-6	Lembar jawaban	1	40
Total				**100**

VI. Rubrik

A. Kriteria Nilai Presentasi

Nilai	Penyampaian Presentasi
85-90	Kelompok mampu menyampaikan penjelasan secara logis, lancar, dan tepat waktu serta mampu menjawab pertanyaan-pertanyaan dari rekan mahasiswa maupun pengajar
75-84	Kelompok mampu menyampaikan penjelasan secara logis dan lancar dan dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan dari rekan mahasiswa maupun pengajar, tetapi kurang dapat mengatur waktu dengan baik
65-74	Kelompok mampu menyampaikan penjelasan secara lancar tetapi kurang dapat menyampaikan logika penalarannya
55-64	Kelompok kurang mampu menyampaikan penjelasan secara lancar dan tepat waktu dan kurang dapat menyampaikan logika penalarannya
<55	

B. Kriteria Nilai Esai

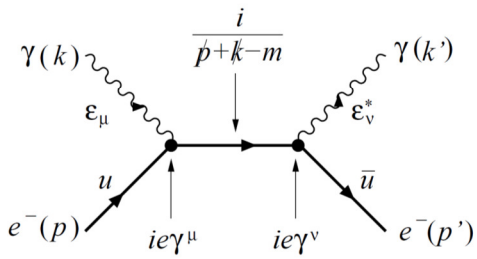
Nilai	Kualitas Jawaban
100	Jawaban sangat tepat, semua pengertian dan komponen utama dijelaskan dengan sangat lengkap
76-99	Jawaban cukup tepat, pengertian dan komponen utama dijelaskan cukup lengkap
51-75	Jawaban kurang tepat, pengertian dan komponen utama dijelaskan dengan kurang lengkap
26-50	Jawaban sangat kurang tepat, pengertian dan komponen utama dijelaskan dengan sangat kurang lengkap

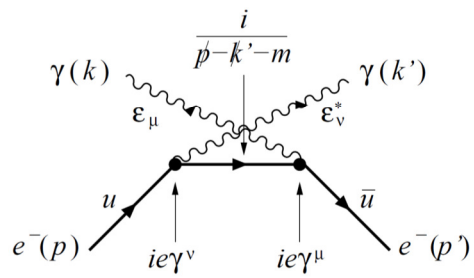
<25	Jawaban salah

VII. Lampiran: Contoh Tugas Proyek

HAMBURAN COMPTON PADA ELEKTRON

- Tunjukkan bahwa dengan menggunakan hukum-hukum kekekalan bilangan kuantum, diagram Feynman hamburan Compton untuk elektron dapat digambarkan seperti di bawah ini.





- Dengan menggunakan diagram Feynman di atas tunjukkan bahwa amplitudo hamburan Compton pada elektron dapat ditulis sebagai:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{A}_{\gamma e^-} &= \bar{u}(\boldsymbol{p}', s') ie\gamma^\mu \epsilon'^*_\mu \frac{i(\not{p} + \not{k} + m)}{(p+k)^2 - m^2} ie\gamma^\nu \epsilon_\nu \, u(\boldsymbol{p}, s) \\
&\quad + \bar{u}(\boldsymbol{p}', s') ie\gamma^\nu \epsilon_\nu \frac{i(\not{p} - \not{k}' + m)}{(p-k')^2 - m^2} ie\gamma^\mu \epsilon'^*_\mu \, u(\boldsymbol{p}, s) \\
&= ie^2 \epsilon'^*_\mu \epsilon_\nu \, \bar{u}(\boldsymbol{p}', s') \left\{ \frac{\gamma^\mu \not{k} \gamma^\nu + 2\gamma^\mu p^\nu}{2p \cdot k} + \frac{\gamma^\nu \not{k}' \gamma^\mu - 2\gamma^\nu p^\mu}{2p \cdot k'} \right\} u(\boldsymbol{p}, s),
\end{aligned}
$$

- Buktikan bahwa amplitudo hamburan tersebut bersifat invarian tera (*gauge invariant*).

- Dengan menggunakan teorema *trace* buktikan bahwa penampang lintang hamburan Compton dari elektron dapat ditulis sebagai:

$$
\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{lab}} = \frac{\alpha^2}{4m^2} \left(\frac{\omega'}{\omega} \right)^2 \left[\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} + 4(\epsilon \cdot \epsilon'^*)^2 - 2 \right]
$$

  Formula di atas dikenal sebagai formula Klein-Nishina untuk hamburan Compton.

- Jika foton tidak terpolarisasi buktikan bahwa penampang lintang di atas dapat direduksi menjadi:

$$
\left. \frac{d\bar{\sigma}}{d\Omega} \right|_{\text{lab}} = \frac{\alpha^2}{2m^2} \left(\frac{\omega'}{\omega} \right)^2 \left[\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} - \sin^2\theta \right] .
$$